



INSTITUTO FEDERAL

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO
COORDENAÇÃO DO CURSO DE 2025
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

GENERSON EDUARDO FIGUEREDO DA SILVA

**PROPOSTA EXPERIMENTAL: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DE LÂMPADAS LED
& FLUORESCENTE A PARTIR DE UM ESPECTRÔMETRO ÓPTICO ARTESANAL**

SALGUEIRO

2025

GENERSON EDUARDO FIGUEREDO DA SILVA

PROPOSTA EXPERIMENTAL: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DE LÂMPADAS LED &
FLUORESCENTE A PARTIR DE UM ESPECTRÔMETRO ÓPTICO ARTESANAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do curso de
Licenciatura em Física do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do
Sertão Pernambucano, campus Salgueiro,
como requisito parcial à obtenção do
diploma em curso superior como graduado
de Licenciatura Plena em Física.

Orientador(a): Prof. Thiago Alves de Sá
Muniz Sampaio

SALGUEIRO

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

GENERSON EDUARDO FIGUEREDO DA SILVA

PROPOSTA EXPERIMENTAL: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DE LÂMPADAS LED &
FLUORESCENTE A PARTIR DE UM ESPECTRÔMETRO ÓPTICO ARTESANAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do curso de
Licenciatura em Física do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do
Sertão Pernambucano, campus Salgueiro,
como requisito parcial à obtenção do
diploma em curso superior como graduado
de Licenciatura Plena em Física.

Aprovado em: 29/10/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

Prof. Marcelo Souza da Silva
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

Prof. Wellington dos Santos Souza
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

Prof. João Lucas Ribeiro
Escola Professor Paulo Freire

SALGUEIRO

2025

Dedicatória.

*Aos meus pais, Genésio Gaciano da Silva
& Elizângela Figueredo da Silva.*

*Aos meus irmãos, Ester Vitória Figueredo
da Silva & Hemerson Vinícios Figueredo
da Silva.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio, pela orientação excepcional. Sem ele, não teria sido possível a realização deste trabalho nem o desenvolvimento do PIBIC, no qual também atuou como meu orientador.

Aos Profs. participantes da banca examinadora, pelo tempo dedicado, pelas valiosas contribuições e pelas sugestões apresentadas.

Ao Prof. Handherson Leyltton, pelo apoio na minha estadia inicial em Salgueiro-PE e pela grandiosa solidariedade sempre apresentada.

Ao Prof. Eriverton Rodrigues, pelo apoio na obtenção do botijão de gás, pelas inúmeras caronas e pelas conversas enriquecedoras.

À Prof. Raquel Costa, pela doação de utensílios domésticos, incluindo um elegante conjunto de porcelana que abrigou cafés da manhã, almoços, chás da tarde e jantares com sopa.

Ao Prof. Pedro Lemos, pela confiança em minha capacidade ao longo dos quatro projetos de extensão de que participamos em conjunto.

Ao Prof. Júlio Mota, pela condução dedicada do nosso projeto de Tutoria, cuja atuação não merece nenhuma crítica.

Ao Prof. Marcelo Souza, pelas brilhantes inspirações em suas aulas experimentais e pelos valorosos conselhos expressados também fora delas.

Ao Prof. Antonildo, pelas cuidadosas correções de relatórios.

Aos Profs. Daiane dos Santos, Pedro Matos e Wellington Souza, pelas deduções minuciosas demonstradas durante as aulas teóricas.

Ao técnico Samuel, pela boa convivência no programa Partiu IF.

Aos meus pais, pelas oportunidades que me proporcionaram — oportunidades estas que não tiveram acesso quando tinham a minha idade.

Ao Pres. Lula, por interiorizar a educação superior pública, gratuita e de qualidade, possibilitando mais acesso a este nível na formação de brasileiros.

Ao amigo Joniarmison Gomes do Nascimento, pelo grande auxílio e pela companhia tanto durante as aulas mais difíceis quanto nas escaladas de domingo.

Ao amigo Santiago Lacerda, pelas conversas, risos e lágrimas que antecederam cada conquista.

E, finalmente, a Deus, pela humildade e pela inteligência que me têm sido concedidas.

“A espectroscopia óptica na faixa do visível é um dos meios mais diretos e versáteis para investigar a interação da luz com a matéria.” (SALEH; TEICH, 2007, tradução própria).

RESUMO

Este estudo apresenta o desenvolvimento de um espectrômetro artesanal baseado no uso de um webcam em conjunto com o software ImageJ e planilhas digitais para o processamento dos dados, comparando seus resultados com os obtidos pelo Thremino Spectrometer. O método consistiu em converter pixels em comprimentos de onda (nm) por meio de regressão linear, possibilitando a construção de perfis espectrais contínuos. Foram analisadas três fontes de luz — lâmpada fluorescente, LED de luz fria e LED de luz quente — com e sem filtros ópticos (vermelho, verde e azul). Os resultados mostraram concordância satisfatória com o método de referência, com deslocamentos médios de algumas dezenas de nanômetros. Diferenças mais significativas ocorreram no LED quente devido à saturação do sensor, mas puderam ser explicadas e corrigidas com ajustes experimentais. A análise com filtros possibilitou estimar os percentuais de absorção e transmissão em diferentes faixas do visível, confirmando a seletividade espectral esperada. Em síntese, a metodologia proposta demonstra ser um recurso viável, eficaz e de baixo custo para fins didáticos e experimentais, capaz de aprimorar a aprendizagem e a compreensão da espectroscopia óptica.

Palavras-chave: Espectroscopia óptica. Fluorescente, LED. Metodologia artesanal.

ABSTRACT

This study presents the development of a homemade (low-cost) spectrometer based on the use of a webcam combined with ImageJ software and digital spreadsheets for data processing, comparing its results with those obtained using the Theremino Spectrometer. The method consisted of converting pixel distances into wavelength values (nm) through linear regression, enabling the construction of continuous spectral profiles. Three light sources were analyzed — a fluorescent lamp, a cool white LED, and a warm white LED — both with and without optical filters (red, green, and blue). The results showed satisfactory agreement with the reference method, with average deviations of a few tens of nanometers. Larger discrepancies occurred for the warm LED due to sensor saturation, which were explained and corrected through experimental adjustments. The analysis with filters made it possible to estimate the percentages of absorption and transmission across the visible range, confirming the expected spectral selectivity. In summary, the proposed methodology proves to be a viable, effective, and low-cost tool for educational and experimental purposes, capable of improving the learning process and the understanding of optical spectroscopy.

Keywords: Optical spectroscopy. Fluorescent Lamp, LED. Low-cost methodology

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	DISPERSÃO	14
2.2	DIFRAÇÃO	15
2.3	ESPECTROSCOPIA	17
2.4	ABSORBÂNCIA DA LUZ	20
2.5	LUZ QUENTE & LUZ FRIA	22
3	PROCESSOS METODOLÓGICOS	23
3.1	MATERIAIS	23
3.2	MÉTODOS	25
3.2.1	Construção do Espectrômetro	25
3.2.2	Calibração & Aquisição de Dados	26
3.2.3	Testes Experimentais	27
3.2.4	Processamento dos dados	30
4	RESULTADOS & DISCUSSÕES	33
4.1	ANALISANDO RESULTADOS	34
4.1.1	Lâmpada Fluorescente	35
4.1.2	LED de Luz Quente	36
4.1.3	LED de Luz Fria	39
4.2	ESPECTROS DOS FILTROS ÓPTICOS DA CIDEPE	41
4.2.1	Lâmpada Fluorescente + Filtros Ópticos CIDEPE	42
4.2.2	Lâmpada LED Luz Quente + Filtros Ópticos CIDEPE	45
4.2.3	Lâmpada LED Luz Fria + Filtros Ópticos CIDEPE	48
4.2.4	Coeficiente de Absorção por Intensidade Relativa	52
4.3	AVALIANDO RESULTADOS	55
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A — ESPECTRÔMETROS & PREÇOS	60
	APÊNDICE B — ILUSTRAÇÃO DO ESPECTRÔMETRO	61
	APÊNDICE C — SOFTWARES UTILIZADOS	62

1 INTRODUÇÃO

A óptica constitui uma das áreas mais antigas e, ao mesmo tempo, mais dinâmicas da física, dedicada ao estudo da luz, sua propagação e suas interações com a matéria (HECHT, 2016). No interior desse vasto campo, a espectroscopia óptica na faixa do visível ocupa papel de destaque, pois permite investigar assinaturas espectrais, compreender mecanismos de emissão e avaliar propriedades físico-químicas de sistemas naturais e artificiais (SALEH; TEICH, 2019).

Trata-se, portanto, de uma ferramenta versátil, de grande relevância tanto para pesquisa científica quanto para aplicações tecnológicas e didáticas. Apesar de sua importância, o acesso a espectrômetros comerciais ainda é limitado devido ao alto custo (Figura 1) e à necessidade de infraestrutura laboratorial especializada. Esse cenário restringe a inserção de práticas de espectroscopia em instituições de ensino públicas e em projetos de iniciação científica (ZILIO, 2010).

Figura 1: Exemplo de espectrômetro comercial.



Fonte: PROLAB, 2025.

Tal realidade suscita a necessidade de alternativas metodológicas que conciliem acessibilidade, baixo custo e confiabilidade, sem abrir mão de um resultado científico satisfatório. Nesse contexto, a construção de espectrômetros artesanais surge como proposta viável e inovadora, capaz de democratizar o acesso a práticas experimentais. Além de explorar conceitos fundamentais de refração, difração e dispersão da luz (HALLIDAY; RESNICK, 2016), tais dispositivos contribuem para a produção científica — ainda que de maneira introdutória — e a formação crítica dos estudantes, estimulando a criatividade, a autonomia (FREIRE, 1996) e o protagonismo no processo de ensino-aprendizagem (MORAN, 2013).

O instrumento utilizado nesse processo é o espectrômetro, cuja função é dispersar a radiação incidente, separar os comprimentos de onda e registrar o espectro resultante, permitindo tanto a análise qualitativa quanto a quantitativa das fontes luminosas.

Por isso, o presente trabalho, tem como objetivo propor e aplicar uma metodologia experimental baseada na construção de um espectrômetro óptico artesanal, desenvolvido em MDF e compensado, utilizando como elemento dispersor uma rede de difração adaptada de um DVD e uma webcam 1080p como detector, além de alguns filtros ópticos: Vermelho, Verde e Azul, afim de calibrar e verificar a confiabilidade do instrumento durante a captura das medidas.

Esse sistema foi empregado para a análise espectral de lâmpadas fluorescentes e LED, na faixa do visível, com o auxílio dos softwares Theremino Spectrometer (análise qualitativa) e ImageJ, em conjunto com planilhas no Excel (análise quantitativa). Essa metodologia se distingue pelo tratamento completo do perfil espectral obtido, permitindo — através de uma análise dos pixels das imagens capturadas dos espectros — obter comprimentos de onda (λ) e suas respectivas intensidades relativas em cada ponto do perfil de onda avaliados.

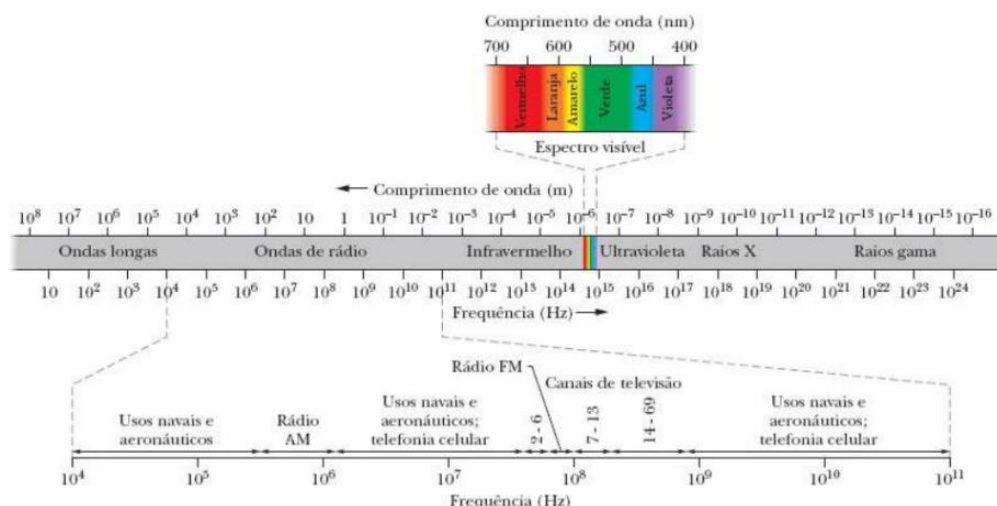
Este trabalho está organizado da seguinte maneira: inicialmente apresenta-se a fundamentação teórica acerca da espectroscopia óptica na faixa do visível, com ênfase nos fenômenos associados a dispersão e difração da luz. Em seguida, descreve-se a instrumentação desenvolvida, os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos empregados. Posteriormente, discutem-se os resultados experimentais e sua análise comparativa com valores de referência adquiridos pelo Theremino Spectrometer. Por fim, apresentam-se as conclusões, as perspectivas de aprimoramento do dispositivo construído e possíveis ampliações de sua utilização.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A espectroscopia é a área da Física que investiga a interação da radiação eletromagnética com a matéria, possibilitando a análise de propriedades fundamentais de átomos e moléculas (SALEH; TEICH, 2019). Esse campo fornece informações qualitativas e quantitativas sobre a composição da luz e distingue-se da espectrometria, a qual está voltada para a quantificação dessas interações por meio da medição precisa da intensidade das radiações com detectores eletrônicos ou fotoelétricos (ZILIO, 2009; TIPLER; MOSCA, 2011).

No âmbito do visível, a espectroscopia explora a faixa espectral de aproximadamente 400 a 700 nm, permitindo a caracterização de fontes luminosas de forma acessível e didática (Figura 2).

Figura 2: O Espectro Eletromagnético.



Fonte: HALLIDAY; RESNICK, 2016.

No contexto educacional, esses estudos são relevantes não apenas para a compreensão dos fundamentos da óptica, mas também para a aproximação do estudante com instrumentos experimentais que reproduzem, em escala simplificada, os princípios de equipamentos científicos mais sofisticados.

Para que a análise espectral seja viabilizada, torna-se fundamental compreender os fenômenos ópticos responsáveis pela decomposição da luz em seus diferentes comprimentos de onda. Entre esses fenômenos, a dispersão e a difração desempenham papel de destaque, pois possibilitam a formação de padrões característicos a partir dos quais se obtêm informações espectrais.

2.1 DISPERSÃO

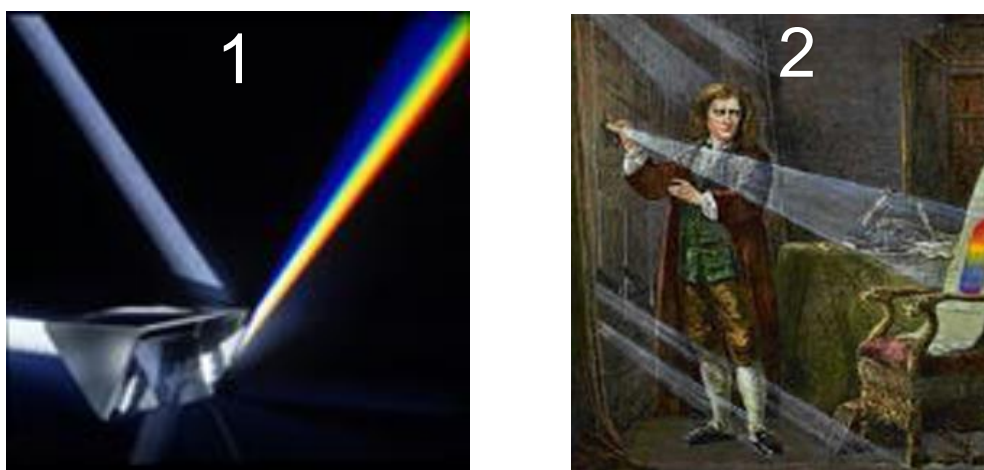
A dispersão consiste na separação dos diferentes comprimentos de onda da luz, fenômeno que ocorre em virtude da dependência da velocidade de propagação com a frequência ou o comprimento de onda descrito pelo índice de refração:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

em (1), temos a razão entre a velocidade da luz no vácuo, c e sua velocidade no meio v .

No caso dos prismas, (Figura 3-1), a dispersão decorre da variação do índice de refração com λ , de modo que a luz branca se decompõe em um espectro contínuo (HECHT, 2017). Esse processo, historicamente explorado nos experimentos de Newton (Figura 3-2), representa um marco na fundação da espectroscopia óptica (FORATO, 2016).

Figura 3: em 1 — Prisma Triangular e em 2 — Newton utilizando um prisma triangular.

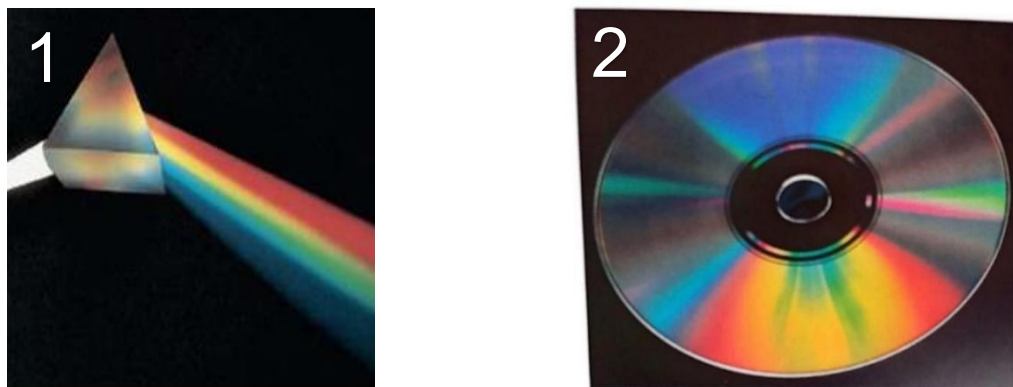


Fonte: (FORATO, 2016).

Contudo, a dispersão prismática é mais acentuada em comprimentos de onda menores (violeta e azul), o que limita sua uniformidade (Figura 4-1). Redes de difração, por sua vez, apresentam uma dispersão mais homogênea, resultante da interferência da luz difratada em múltiplas fendas regularmente espaçadas. Isso confere maior precisão e simplicidade de interpretação, razão pela qual foram

empregadas no espectrômetro artesanal desenvolvido neste trabalho, que utiliza um disco de DVD como elemento dispersor (Figura 4-2).

Figura 4: Formas de dispersão da luz — em 1 – Prisma & 2 – CD/DVD.



Fonte: HALLIDAY; RESNICK, 2016.

2.2 DIFRAÇÃO

A difração corresponde ao fenômeno pelo qual a luz contorna obstáculos ou atravessa fendas, propagando-se em regiões que, geometricamente, estariam em sombra. Esse efeito pode ser interpretado pelo princípio de Huygens, segundo o qual cada ponto de uma frente de onda funciona como fonte de novas ondas secundárias (HECHT, 2017). No caso da fenda dupla em (2), observa-se o surgimento de máximos e mínimos de intensidade resultantes da superposição das ondas. A diferença de caminho óptico entre as duas fendas, Δr , determina a condição de interferência:

$$\Delta r = d \cdot \sin \theta \quad (2)$$

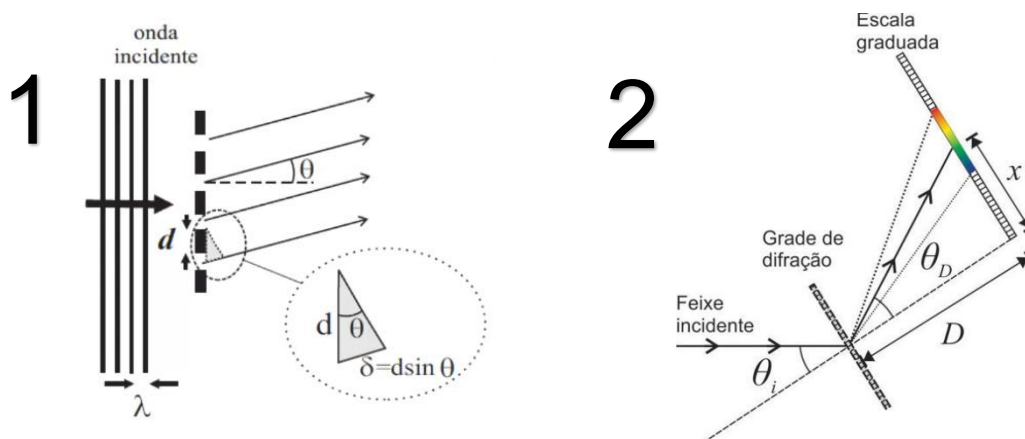
onde d é a distância entre as fendas e θ o ângulo de observação em relação ao eixo central (3). Quando essa diferença é igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda λ , ocorre interferência construtiva:

$$d \sin \theta = m \cdot \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (3)$$

O máximo central corresponde a $m = 0$, e os máximos laterais aparecem em ordens crescentes, com intensidade decrescente. Essa formulação representa a

base conceitual para o entendimento das redes de difração (Figura 5-1), que podem ser vistas como uma generalização da fenda dupla para um grande número de fendas igualmente espaçadas (N). Em se tratando de espectrômetros artesanais, a rede é substituída por um DVD, cujos sulcos funcionam como fendas. A luz incidente gera, por difração, um espectro visível contínuo (Figura 5-2).

Figura 5: 1 — Diferença de caminhos e 2 — Rede de difração ilustrada.



Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2016; AZEVEDO ET AL, 2019.

Nesse caso, dois parâmetros se tornam centrais: o poder de dispersão e o poder de resolução (4). O primeiro descreve a capacidade de separar comprimentos de onda próximos em diferentes ângulos, enquanto o segundo expressa a habilidade de distinguir linhas espectrais muito próximas, dado por:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m \cdot N \quad (4)$$

Onde m é a ordem do máximo e N o número total de fendas (ranhuras) iluminadas. Assim, quanto maior o número de fendas, mais estreitos e definidos se tornam os picos de intensidade, permitindo maior precisão espectral (HALLIDAY; RESNICK, 2016; YOUNG; FREEDMAN, 2016).

No arranjo experimental aqui proposto, o elemento dispersor é um fragmento de DVD, cuja pista típica apresenta um espaçamento de $\approx 0,74 \mu\text{m}$ (≈ 1351 linhas/mm), cumpre esse papel de rede de difração, fornecendo a separação dos comprimentos de onda da luz incidente e possibilitando a análise espectral de maneira acessível.

2.3 ESPECTROSCOPIA

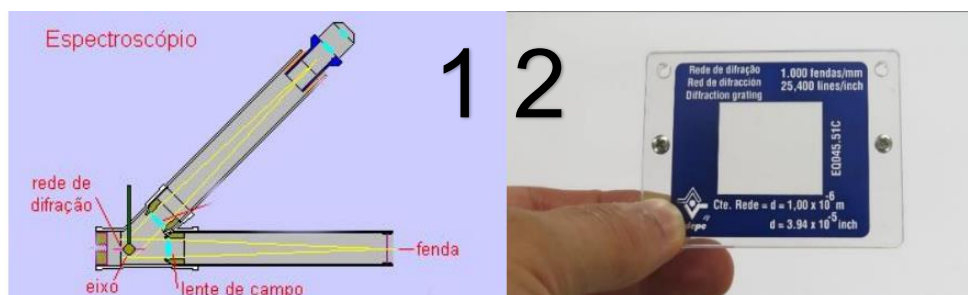
Espectroscopia refere-se à ciência que estuda as interações da radiação eletromagnética com a matéria, englobando processos de natureza atômica e molecular. Já a espectrometria corresponde à quantificação dessas interações, por meio da medida das intensidades de radiação com auxílio de detectores e dispositivos eletrônicos. No âmbito instrumental, destaca-se a distinção entre espectroscópio e espectrômetro (YOUNG; FREEDMAN, 2016).

O espectroscópio é o dispositivo mais simples, utilizado para a observação direta de espectros — contínuos, de emissão ou de absorção — sem, contudo, fornecer dados quantitativos. É frequentemente empregado em demonstrações didáticas, como a visualização das linhas espectrais em tubos de descarga.

Por outro lado, o espectrômetro constitui um instrumento mais sofisticado, projetado não apenas para dispersar a radiação e separar seus comprimentos de onda, mas também para registrar e quantificar propriedades espectrais, tais como intensidade, energia e distribuição relativa. Para isso, incorpora, além do sistema de dispersão (rede de difração ou prisma), são necessários também detectores e sistemas de aquisição (placas fotográficas, fotodiodos, entre outros). Trata-se, portanto, de um dispositivo indispensável para análises científicas de maior rigor, amplamente empregado em laboratórios de física, química e astronomia (SALEH; TEICH, 2019).

Dispositivos que usam redes de difração, como os espectroscópios, são frequentemente empregados para analisar a luz emitida por lâmpadas e estrelas. Eles funcionam separando a luz nos seus diferentes comprimentos de onda, o que permite estudar as características específicas dessas fontes de luz (OLIVEIRA; LEITE, 2016).

Figura 6: 1 – Diagrama de espectroscópio ao lado de 2 – Rede de difração laboratorial.

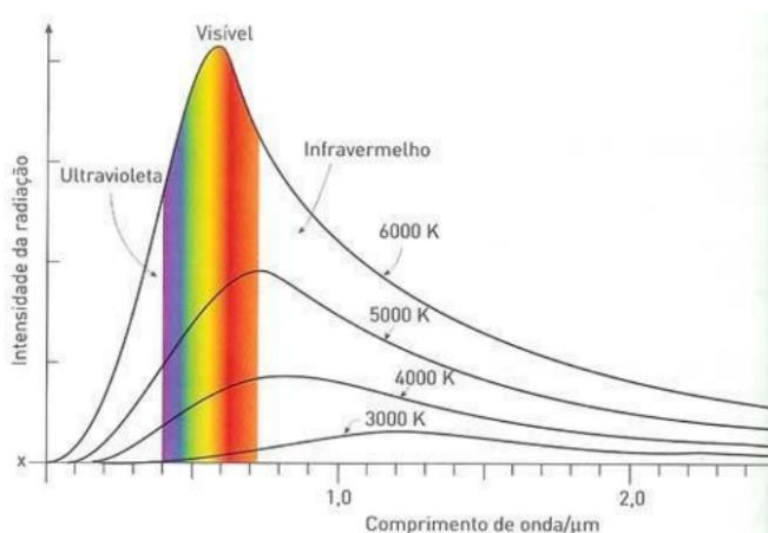


Fonte: OBSERVATÓRIO PHOENIX, sem data.

A resolução de uma rede de difração, entendida como sua capacidade de distinguir comprimentos de onda muito próximos, aumenta proporcionalmente ao número de fendas iluminadas. Essa elevada resolução é importante para a obtenção de espectros mais definidos e detalhados (YOUNG; FREEDMAN, 2016).

Fontes luminosas comuns, como o Sol e as lâmpadas incandescentes, emitem luz em diversas frequências, incluindo a visível. Um conceito fundamental para entender a emissão dessas fontes é o do corpo negro, um modelo físico ideal que absorve e emite radiação em todas as frequências, produzindo um espectro contínuo cuja intensidade máxima é determinada unicamente por sua temperatura (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014).

Figura 7: Espectro de corpos negros à diferentes temperaturas.



Fonte: OLIVEIRA FILHO; SARAIVA 2014.

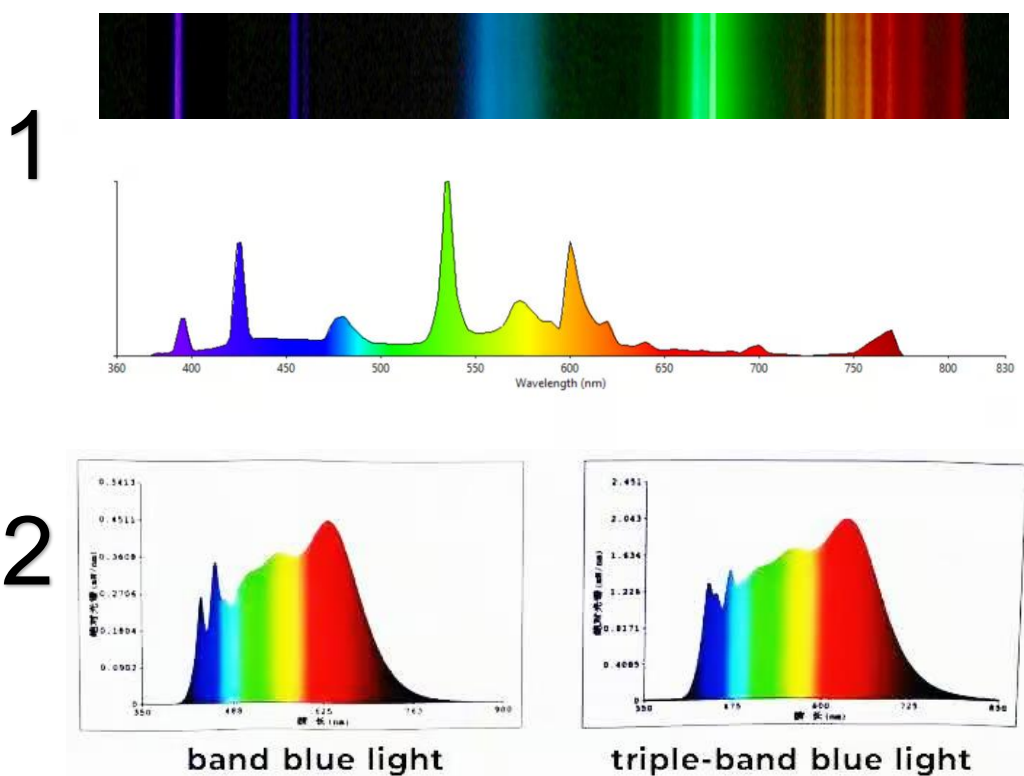
A luz das lâmpadas fluorescentes tem sua origem nos princípios dos espectros de emissão atômicos. Nesse processo, a excitação de uma mistura interna de gases de mercúrio e argônio produz radiação ultravioleta. Essa radiação invisível é então convertida em luz visível quando é absorvida e reemitida por uma camada de fósforo no interior do tubo, em um fenômeno denominado fluorescência. Como resultado, o espectro gerado é caracterizado por faixas discretas e bem definidas (Figura 8-1), em contraste com o espectro contínuo e amplo da luz solar (HEWITT, 2015).

De modo distinto, os LEDs (Diodos Emissor de Luz) produzem luz por meio de processos semicondutores. Nesses dispositivos, a recombinação de elétrons e

lacunas na junção p–n libera energia na forma de fótons, em um fenômeno denominado eletroluminescência. O comprimento de onda da radiação emitida está diretamente associado à energia da banda proibida (E_g) do material semiconductor.

No caso dos LEDs brancos (Figura 8-2), o espectro pode ser obtido pela combinação de diferentes LEDs coloridos (azul, verde e vermelho) ou, mais frequentemente, pelo uso de um LED azul recoberto por fósforo, que converte parte da radiação azul em comprimentos de onda maiores. O resultado é um espectro relativamente contínuo na faixa do visível, embora com características distintas das lâmpadas fluorescentes (SALEH; TEICH, 2019; HECHT, 2017).

Figura 8: 1 — Exemplo discreto de espectro de lâmpada fluorescente contrastada diante do próprio perfil de onda associado a ela com os picos concomitantes entre ambas imagens e 2 — exemplo de espectros de LEDs Branco.



Fonte: LEDYI, 2022.

Perceba que a Figura 8-1 corresponde aos picos conforme a maior concentração de intensidade luminosa do espectro visível da lâmpada fluorescente.

2.4 ABSORBÂNCIA DA LUZ

Enquanto os fenômenos de emissão e fluorescência descrevem a geração de luz, a interação desta com a matéria frequentemente envolve sua atenuação. Quando a luz — proveniente, por exemplo, de um LED ou de uma lâmpada fluorescente — incide sobre um material, parte de sua intensidade pode ser absorvida. A medida dessa capacidade de um meio em reter energia luminosa é quantificada pela grandeza denominada absorvância (YOUNG; FREEDMAN, 2016).

Segundo Bertie (2006), a energia luminosa incidente sobre um corpo é dividida em três frações fundamentais de luz: a absorvida (α — absorvância), a transmitida (T) e a refletida (R). Em amostras não luminescentes, a soma dessas componentes é igual à unidade, expressando a conservação da energia luminosa incidente:

$$\alpha + T + R = 1 \quad (5)$$

A partir dessa relação, tem-se que $1 - \alpha = R + T$. Assim, para amostras que espalham luz — e não são luminescentes —, a absorvância (A) é definida como:

$$A = -\log(1 - \alpha) \quad (6)$$

De forma equivalente, substituindo-se $1 - \alpha$ por $R + T$, obtém-se a formulação geral:

$$A = -\log(R + T) \quad (7)$$

No caso particular em que a reflexão é desprezível ($R=0$), tem-se $T = 1 - \alpha$, e a expressão reduz-se à forma clássica amplamente empregada em espectroscopia:

$$A = -\log(T) \quad (8)$$

A grandeza $T = \frac{I}{I_0}$ representa a transmitância, ou seja, a fração de luz que atravessa o material em relação à intensidade incidente (I_0). Portanto, uma

transmitância de 100% ($I=I_0$) resulta em uma absorbância nula ($A=0$), enquanto $I=0$ conduz à absorbância máxima ($A=1$). Em muitos contextos físico-químicos, a absorbância também é descrita pela Lei de Beer-Lambert, expressa por:

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l = -\log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (9)$$

Onde ε representa o coeficiente de absortividade molar, c a concentração da substância absorvedora e l o comprimento do caminho óptico. Essa lei fundamenta-se na relação logarítmica anteriormente apresentada, conectando a atenuação da luz às propriedades ópticas e geométricas do meio.

No presente estudo, adotou-se essa outra relação obtida a partir de (5), desconsiderando o termo de reflexão (R), uma vez que os filtros ópticos utilizados são de material refratores compostos de vidro e acrílico, materiais de baixa refletividade e alto índice de transmissão na faixa do visível. Assim, considera-se que praticamente toda a energia não transmitida é absorvida, justificando o uso direto da forma linear:

$$\alpha = 1 - \frac{I}{I_0} \quad (10)$$

Essa formulação representa um caso idealizado, porém adequado aos objetivos experimentais deste trabalho, permitindo avaliar qualitativamente a seletividade espectral dos filtros ópticos e comparar suas propriedades de absorção e transmissão sem comprometer a consistência física dos resultados.

Os conceitos discutidos neste item fundamentam a análise experimental apresentada na seção 4.2, na qual são estimadas as frações de luz transmitida e absorvida em diferentes faixas do espectro visível, demonstrando a aplicabilidade dos princípios de conservação e atenuação luminosa.

2.5 LUZ QUENTE & LUZ FRIA

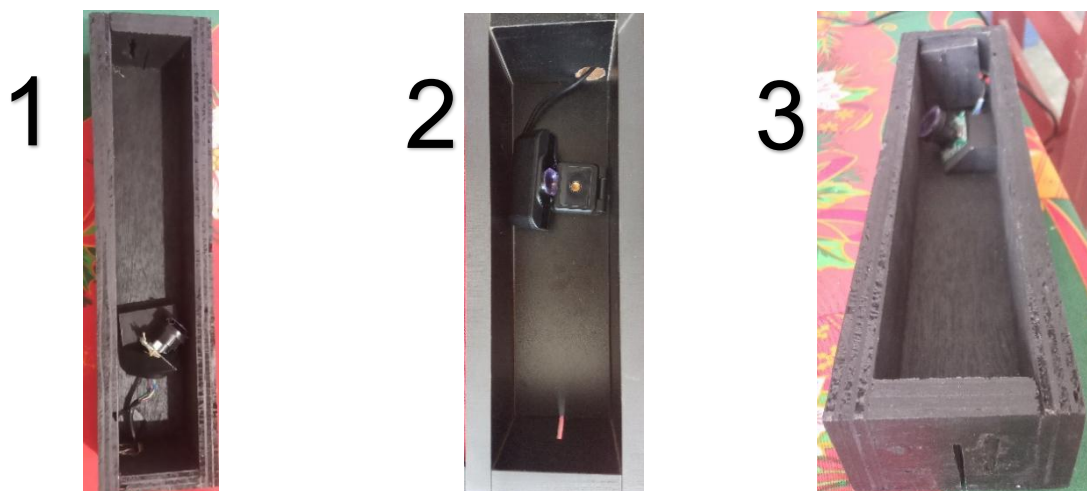
No contexto técnico e comercial, os termos “luz quente” e “luz fria” empregados por engenheiros e fabricantes não se referem à temperatura física da lâmpada, mas sim à temperatura de cor da radiação emitida, expressa em kelvins (K). Essa temperatura corresponde à coloração da luz emitida por um corpo negro ideal aquecido à mesma temperatura, conceito amplamente discutido na teoria da radiação térmica (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

A luz denominada quente apresenta tonalidades amareladas ou avermelhadas, associadas a temperaturas de cor típicas entre 2700 K e 3500 K, semelhantes àsquelas de corpos negros aquecidos a temperaturas relativamente baixas. Essa faixa é característica de lâmpadas incandescentes e de LEDs projetados para reproduzir o aspecto aconchegante da iluminação tradicional. Por outro lado, a luz fria exibe tonalidades esbranquiçadas ou azuladas, correspondendo a temperaturas de cor mais elevadas, geralmente entre 5000 K e 6500 K (COPALUX, 2024).

Essa faixa é observada em lâmpadas fluorescentes e em LEDs de alto rendimento, com aparência denominada “branco-dia”. É fundamental ressaltar que essa classificação não se refere ao aquecimento físico do dispositivo emissor, mas exclusivamente ao aspecto cromático da luz. De fato, uma lâmpada LED de luz fria, embora apresente uma temperatura de cor mais elevada, emite menos calor físico que uma lâmpada incandescente ou LED de luz quente. Portanto, a distinção entre luz quente e fria é cromática e perceptiva, relacionada à composição espectral da radiação emitida, e não à temperatura térmica do equipamento.

Em síntese, a noção de temperatura de cor, fundamentada no comportamento espectral da radiação de corpo negro, possibilita compreender as variações observadas entre diferentes tipos de lâmpadas. Essa grandeza está diretamente associada à distribuição espectral de potência das fontes luminosas, determinando a tonalidade percebida pelo observador. Assim, a distinção entre luz quente e luz fria não decorre de diferenças térmicas reais, mas de propriedades espectrais e perceptivas da radiação emitida, sendo, portanto, um parâmetro usado na análise comparativa das distribuições espectrais desenvolvida neste trabalho.

Figura 10: Espectrômetros feitos em 1 e 3 — compensado e 2 — MDF.



Fonte: elaborada pelo autor.

As dimensões de um espectrômetro podem ser arbitrárias, sendo convencionalmente adotada uma proporção de pelo menos 10 cm de comprimento para cada 1 mm de abertura da fenda. Para a confecção artesanal deste projeto, foram definidas medidas para a produção de dois modelos funcionais. O primeiro espectrômetro foi construído em compensado e fixado com pregos, apresentando as seguintes dimensões: 7,0 cm (altura) x 6,5 cm (largura) x 30,0 cm (comprimento), com uma fenda de 1 mm. O segundo modelo, fabricado em MDF, possuía dimensões de 11,5 cm (altura) x 10,0 cm (largura) x 30,0 cm (comprimento) e também era dotado de uma fenda de 1 mm. A espessura de ambos materiais usados em cada caso foi de 1 cm. Um furo com diâmetro compatível com os cabos USB das webcams foi incluído no projeto, visando facilitar a instalação e a eventual troca dos aparelhos.

Figura 11: das dimensões de um espectrômetro artesanal, 1 – largura de 11,5 cm; 2 – comprimento de 30,0 cm e 3 – altura de 10,0 cm. Adicionalmente, uma fenda de 0,1 cm de espessura por 3,5 cm de comprimento e um furo com 1 cm de diâmetro.



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 MÉTODOS

A metodologia foi desenvolvida com base no espectrômetro artesanal apresentado na Figura 11, ressaltando que os procedimentos descritos podem ser adaptados a outros formatos de espectroscópios ou espectrômetros, desde que observadas as proporções entre a largura da fenda e o comprimento do dispositivo. Recomenda-se, como parâmetro, que a cada 0,1 cm de espessura da fenda seja mantido, no mínimo, 10 cm de comprimento da estrutura.

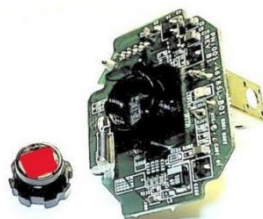
3.2.1 Construção do Espectrômetro

O espectrômetro foi confeccionado em MDF. Embora as dimensões da caixa possam variar, os melhores resultados, considerando o modelo de webcam empregado, foram obtidos com a seguinte configuração: 10,0 cm de altura, 11,5 cm de largura e 30,0 cm de comprimento. A fenda de entrada da luz foi projetada com 0,1 cm de espessura e 3,5 cm de comprimento, podendo ser disposta tanto na orientação vertical quanto horizontal. Utilizamos na vertical (APÊNDICE A-1).

Após o corte das peças de madeira, a pintura interna da estrutura foi realizada com spray preto fosco, procedimento obrigatório para evitar interferências por reflexões indesejadas. A pintura externa, embora realizada, é opcional. A caixa foi montada com cola, sendo a tampa mantida móvel para permitir ajustes na posição da câmera antes de sua fixação definitiva.

A webcam utilizada foi adaptada pela remoção do filtro infravermelho (IR), localizado atrás da lente — etapa realizada para ampliar a faixa espectral registrada. O procedimento (Figura 12) consistiu no desmonte da câmera e na retirada do filtro com auxílio de uma lâmina fina. Ressalta-se que nem todos os modelos de webcam possuem esse filtro, o que pode tornar essa etapa desnecessária em alguns casos.

Figura 12: Remoção do filtro infravermelho.



Fonte: elaborada pelo autor

Após a modificação, a câmera foi posicionada no interior da caixa e acoplada a uma rede de difração. Esta foi obtida a partir de um DVD, do qual se removeu a camada reflexiva, preservando-se apenas a face transparente. O fragmento foi recortado de modo a cobrir totalmente a lente da câmera (Figura 13).

Figura 13: Rede de difração acoplada ao webcam.



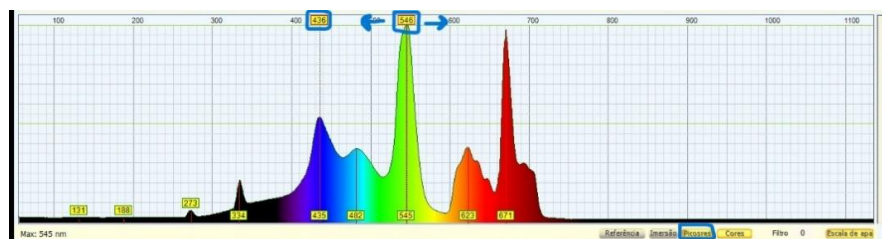
Fonte: elaborada pelo autor

A construção completa do dispositivo, incluindo a madeira, o spray, a webcam e o DVD, custou $\approx$ R\$ 100,00, (APÊNDICE A-2) valor significativamente menor do que os espectrômetros comerciais disponíveis (Figura 1), que facilmente ultrapassam milhares de reais. O APÊNDICE B ilustra o funcionamento do nosso sistema.

3.2.2 Calibração & Aquisição de Dados

Após a montagem, a webcam foi conectada ao computador e inicializada no software Theremino Spectrometer (TS) (APÊNDICE C-1). O alinhamento da câmera foi ajustado até que o espectro visível fosse claramente projetado e captado. Para garantir maior precisão nas análises subsequentes, realizou-se a calibração (Figura 14) do equipamento utilizando uma lâmpada fluorescente como referência.

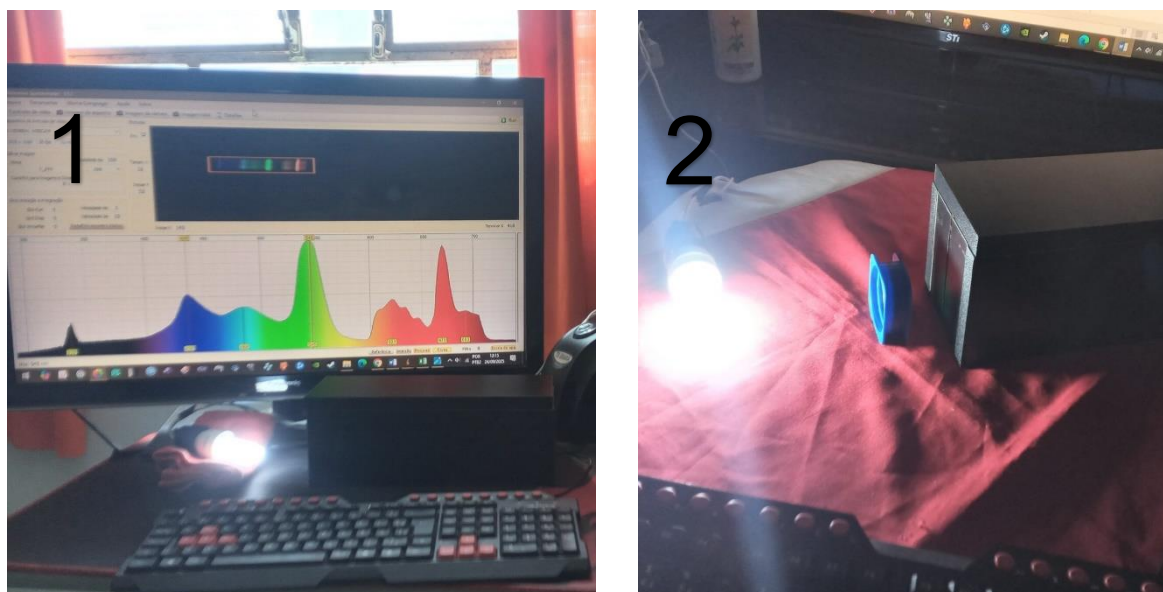
Figura 14: Ajustando os picos no perfil de onda.



Fonte: elaborada pelo autor.

O procedimento consistiu em acessar o menu do software (Ferramentas > Pontos de corte > 436 692) e ativar a função PICOSRES, ajustando manualmente as linhas de 436 nm e 547 nm de modo que coincidissem com os picos do espectro experimental da lâmpada fluorescente. Essa etapa assegurou a calibração inicial necessária para o registro confiável dos espectros de outras fontes luminosas.

Figura 15: 1 – Experimento em funcionamento com lâmpada fluorescente. Na tela do computador é possível verificar o espectro correspondente e o perfil gráfico de onda relacionado. 2 – Experimento utilizando um filtro óptico da CIDEPE à frente dos raios luminosos da lâmpada fluorescente.



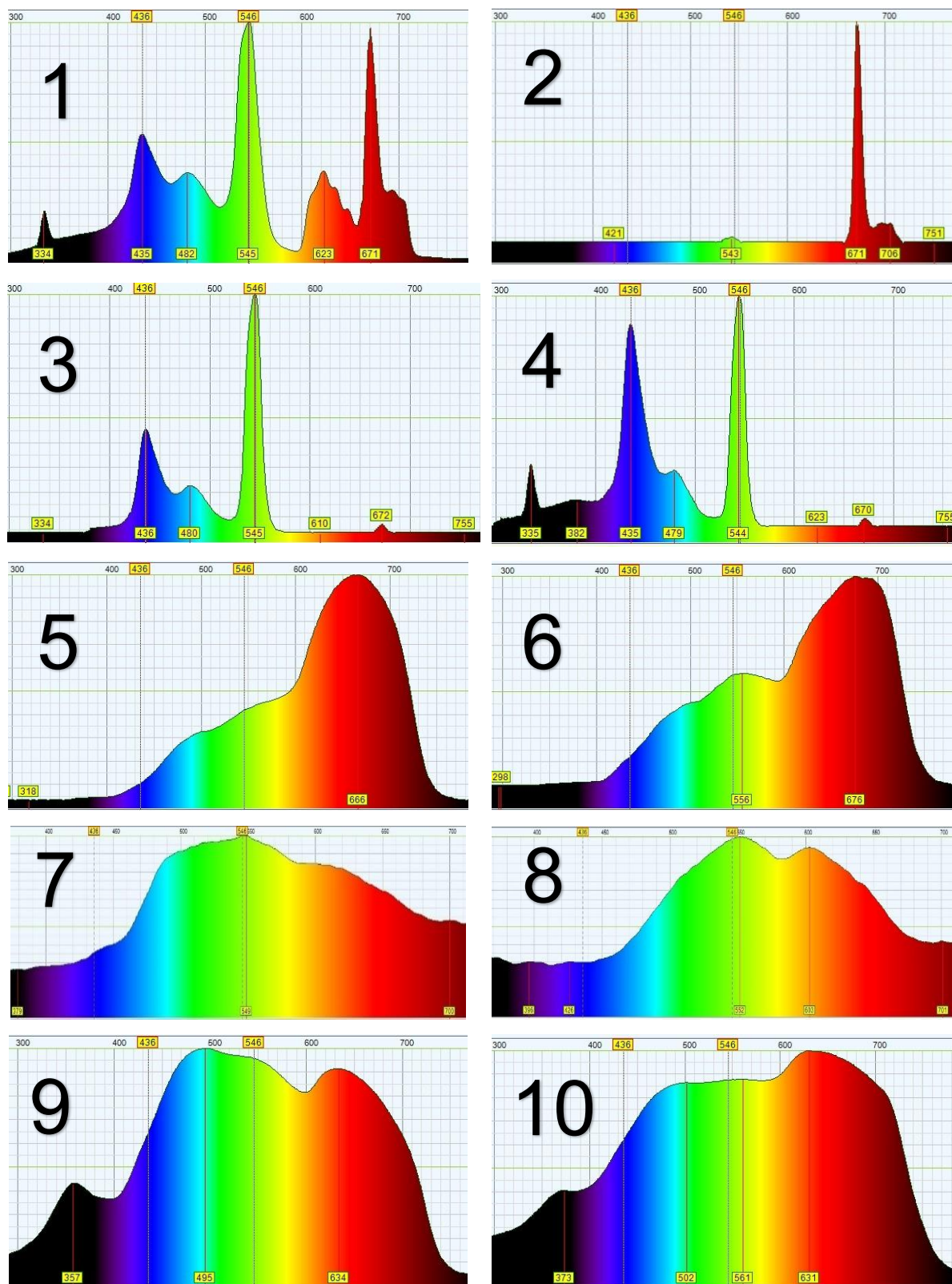
Fonte: elaborada pelo autor.

3.2.3 Testes Experimentais

Após a calibração, foram obtidos espectros de diversas fontes luminosas, incluindo lâmpadas fluorescentes, LEDs brancos (frio e quente), lâmpada incandescente, lâmpada âmbar e luz de vela. Para a lâmpada fluorescente, também foram realizados testes com filtros industriais (Figura 16-A) nas cores azul, verde e vermelho, a fim de comparar os perfis espectrais com e sem a presença desses elementos ópticos.

Essa etapa permitiu ilustrar as diferenças entre os espectros contínuos e descontínuos das fontes analisadas, além de verificar a confiabilidade do espectrômetro construído, evidenciada pela capacidade de registrar as alterações produzidas pelos filtros e demais fontes luminosas.

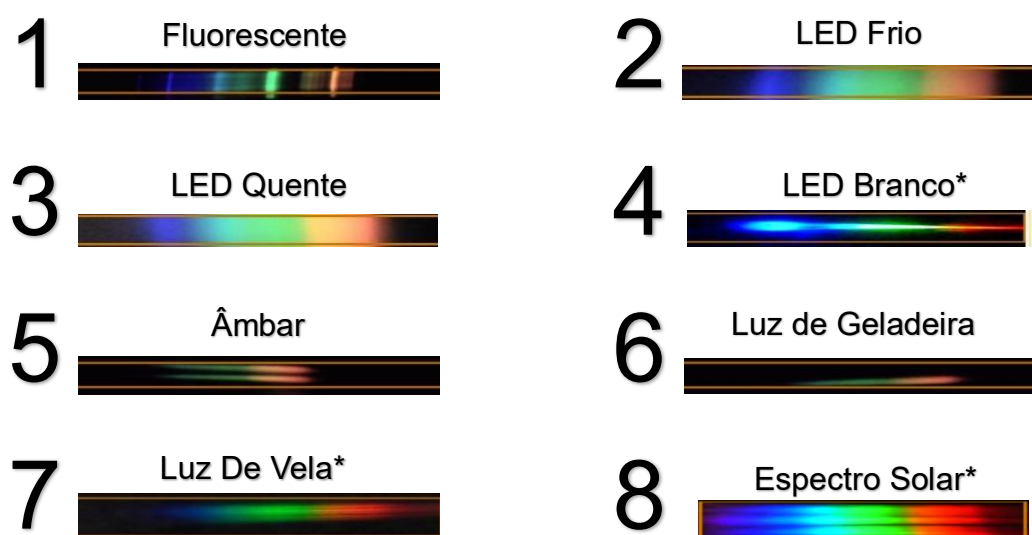
Figura 16-A: perfis de onda de espectros visíveis de diferentes fontes luminosas. 1 – Lâmpada Fluorescente; 2 – Lâmpada Fluorescente filtro vermelho; 3 – Lâmpada Fluorescente filtro verde; 4 – Lâmpada Fluorescente filtro azul; 5 – Lâmpada de Âmbar; 6 – Lâmpada incandescente de Geladeira; 7 – Lanterna de Led branco; 8 – Luz de vela; 9 – LED frio e 10 – LED quente.



Fonte: elaborada pelo autor utilizando o espectrômetro artesanal ligado ao TS.

A Figura 16-B apresenta um conjunto comparativo de espectros obtidos para diferentes fontes luminosas, abrangendo lâmpadas fluorescentes, LEDs de distintas temperaturas de cor (quente, frio, branco e âmbar), bem como fontes incandescentes e naturais, como a luz de vela e o espectro solar. Os espectros registrados permitem observar a diversidade na distribuição espectral de cada tipo de radiação, evidenciando diferenças no contínuo e nas linhas discretas de emissão.

Figura 16-B: Espectros comparativos de diferentes fontes luminosas, incluindo 1 – lâmpadas fluorescentes; 2, 3 e 4 – LEDs de distintas temperaturas de cor (quente, frio e branco); 5 – luz de Âmbar; 6 – lâmpada incandescente de geladeira; até 7 – luz de vela e 8 – o espectro solar.



Fonte: elaborado pelo autor usando Theremino Spectrometer. Em que o * refere-se a espectros registrados com espectrômetros artesanais diferentes do utilizado na coleta principal deste estudo, incluindo, por exemplo, aquele usado no espectro apresentado na Figura 25.

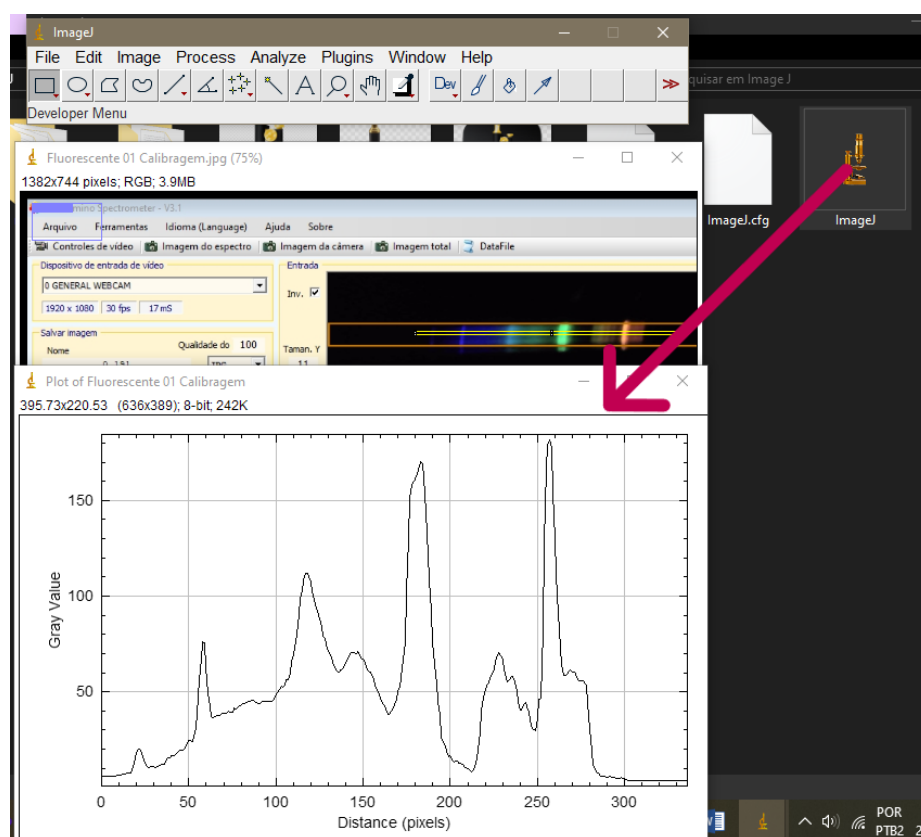
Nota-se que as lâmpadas fluorescentes exibem faixas bem definidas, típicas da emissão do vapor de mercúrio e dos compostos fluorescentes internos, enquanto os LEDs apresentam espectros mais amplos, com variações conforme o material semiconductor e a temperatura de cor. As fontes incandescentes e de chama, por sua vez, revelam espectros contínuos com predominância nas regiões do vermelho e do laranja, condizentes com temperaturas de emissão mais baixas.

O espectro solar, tomado como referência natural, mostra uma distribuição praticamente contínua e equilibrada ao longo de todo o visível, servindo de parâmetro comparativo para as demais fontes analisadas.

3.2.2 Processamento dos Dados.

Os espectros captados pelo Theremino Spectrometer (exclusivamente das lâmpadas fluorescente e LEDs quente e frio) foram exportados como imagens para análise no software ImageJ (IJ) (APÊNDICE C-2), que executa leituras dessas imagens através de escalas de cinza, *Gray Vallue*, (SOUZA ET AL, 2016) em função da posição de pixels (*Distance Pixels*) e exporta seus dados (*File > Open > Analyze > Plot Profile > Data > Copy All Data*) para colagem dos valores no Excel. Embora o TJ indique apenas os principais picos de emissão, o IJ + Excel possibilitou a extração contínua do perfil espectral completo através da nossa metodologia.

Figura 17: Copiando dados no ImageJ a partir dos espectros do Theremino Spectrometer.

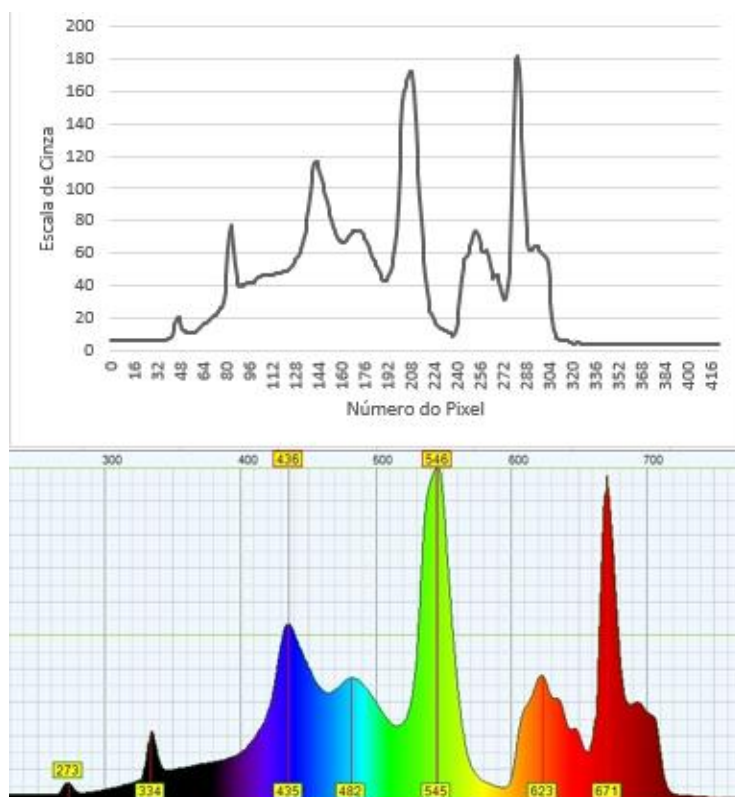


Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ.

Para estabelecer a correspondência entre os dois softwares, construiu-se uma função de conversão entre número de pixel (N_p) e comprimentos de onda (λ nm) com auxílio de programas com planilhas eletrônicas, como o Excel. Essa relação foi

obtida a partir da identificação de pontos correspondentes nos espectros registrados por esses programas computacionais (Figura 18).

Figura 18: Pontos correspondentes entre gráficos TS e IJ + Excel.

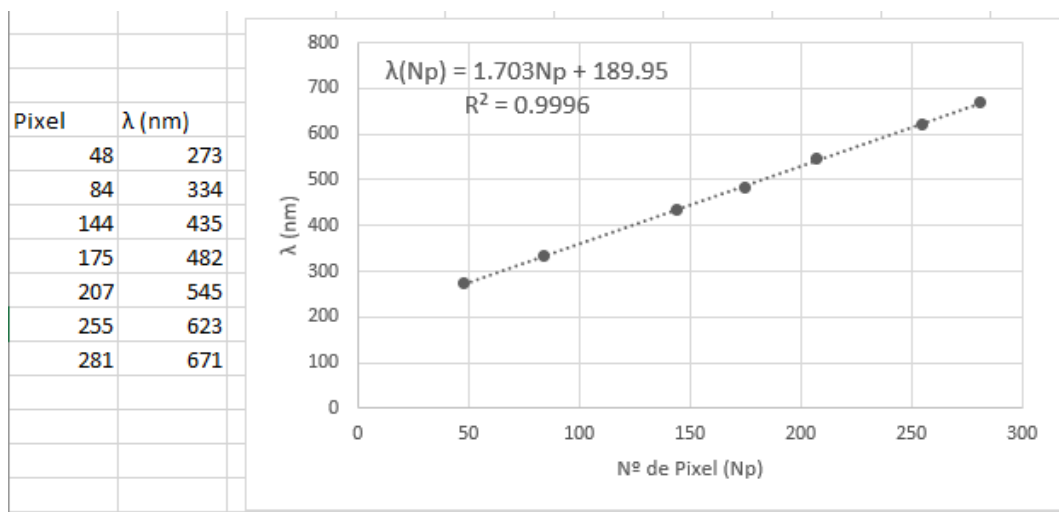


Fonte: elaborado pelo autor utilizando o Excel e o Theremino Spectrometer.

Assim, conforme Figura 18, o comprimento de onda equivalente a 546 nm estaria para o pixel 207 assim como 435 nm estaria para pixel 144 e assim por diante.

Em seguida, (Figura 19), a função $N_p \times \lambda$ foi implementada em planilha eletrônica, possibilitando a conversão direta entre pixels e comprimentos de onda.

Figura 19: Metodologia apresentada — Comparando N_p com λ (nm).



Fonte: elaborado pelo autor utilizando o Excel.

Realizada essa etapa, obteve-se o ajuste linear necessário para avaliar os espectros de diferentes fontes luminosas de forma contínua. A equação (11) expressa a relação que permite converter o número de pixel (N_p) em comprimento de onda (λ), possibilitando a análise completa dos espectros das distintas fontes luminosas investigadas.

$$\lambda_{(N_p)} = 1,703 \cdot N_p + 189,95 \quad (11)$$

É importante destacar que, após a calibração e a obtenção da equação (11), todas as medições subsequentes devem ser realizadas sem alterar as condições iniciais estabelecidas para a captura do primeiro espectro fluorescente. Dessa forma, torna-se possível avaliar novos espectros de diferentes fontes luminosas utilizando a equação derivada desse ajuste linear para todos os pixels avaliados pelo ImageJ.

As intensidades relativas da luz foram determinadas a partir dos valores correspondentes da escala de cinza (*Gray Value*), utilizados como referência comparativa entre os dados obtidos no Thermo Spectrometer (TS) e no ImageJ (IJ).

Esse procedimento possibilitou padronizar os resultados e ampliou a análise quantitativa, superando a limitação do TS de registrar apenas os picos principais. Assim, tornou-se viável avaliar o perfil completo da distribuição espectral das fontes estudadas.

Figura 20: 1 — Conversão do número de pixel (N_p) do IJ em λ (nm), conforme a equação (11). E 2 — Esses valores foram associados à escala de cinza (*Gray Value*), aqui denominada “Intensidade Relativa”, resultando no perfil espectral completo de cada fonte analisada.

1

Número do Pixel	Escala de Cinza	λ (nm)	Intensidade Relativa
0	5.667	$=w2 * 1.703 + 189.95$	
1	5.667		5.67
2	5.667		5.67
3	5.667		5.67
4	5.667		5.67
5	5.667		5.67
6	5.667		5.67
7	5.667		5.67
8	5.667		5.67
9	5.667		5.67
10	5.667		5.67
11	5.667		5.67
12	5.667		5.67
13	5.667		5.67
14	5.667		5.67
15	5.667		5.67
16	5.667		5.67
17	5.667		5.67
18	5.667		5.67
19	5.667		5.67
20	5.667		5.67
21	5.824		5.82
22	5.824		5.82
23	5.667		5.67

2

U	V	W
λ (nm)	Intensidade Relativa	Escala de Cinza
190	5.67	5.667
192	5.67	5.667
193	5.67	5.667
195	5.67	5.667
197	5.67	5.667
198	5.67	5.667
200	5.67	5.667
202	5.67	5.667
204	5.67	5.667
205	5.67	5.667
207	5.67	5.667
209	5.67	5.667
210	5.67	5.667
212	5.67	5.667
214	5.67	5.667
215	5.67	5.667
217	5.67	5.667
219	5.67	5.667
221	5.67	5.667
222	5.67	5.667
224	5.67	5.667
226	5.82	5.824
227	5.82	5.824
229	5.67	5.667

Fonte: elaborada pelo Autor usando o Excel.

4 RESULTADOS & DISCUSSÃO

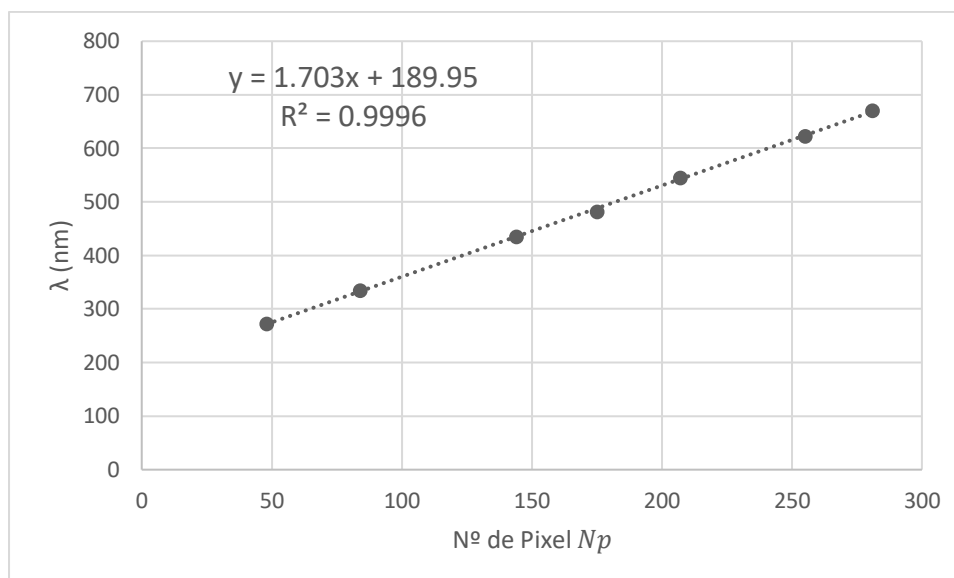
A metodologia aplicada permitiu converter o número de pixel (N_p) obtido no ImageJ em comprimentos de onda λ (nm) (Tabela 2) por meio de regressões lineares (através do Excel), com coeficientes de determinação (R^2) próximos a 0,99 (Figura 21). Essa calibração viabilizou a construção de perfis espectrais completos, ampliando a análise para além dos picos principais. O procedimento foi validado com espectros de três fontes luminosas — fluorescente, LED quente e LED frio — e complementado com filtros ópticos (vermelho, verde e azul).

Tabela 2: Lâmpada fluorescente — associando pixel em λ (nm).

Pixel	λ (nm)
48	273
84	334
144	435
175	582
207	545
255	623
281	671

Fonte: elaborada pelo autor utilizando o Excel, dados coletados no IJ + TS.

Figura 21: Gráfico ($N_p \times \lambda$) — equação da reta para lâmpada fluorescente.



Fonte: elaborada pelo autor utilizando o Excel, dados coletados no IJ.

4.1 ANALISANDO RESULTADOS

A apresentação conjunta da Tabela 2 e Figura 21 para a lâmpada fluorescente permite observar alguns aspectos da metodologia empregada. Em primeiro lugar, nota-se que a equação de regressão linear obtida a partir da calibração pixel- λ apresentaram coeficientes de determinação ($R^2 > 0,99$), o que aparenta ser uma possível consistência e da conversão adotada.

Esse resultado indica que a linearização da escala em pixels para comprimento de onda foi adequada dentro da faixa espectral analisada. Outro ponto relevante diz respeito à comparação entre o Theremino Spectrometer (TS) e a metodologia desenvolvida (ImageJ — IJ — associado ao tratamento em planilhas Excel). Enquanto o software do Theremino tende a registrar apenas os picos principais do espectro, nossa abordagem gera um perfil contínuo da intensidade relativa em função do comprimento de onda.

A equação (11) — $\lambda_{(N_p)} = 1,703N_p + 189,95$ — expressa a relação linear estabelecida entre o número de pixel (N_p) obtido pelo ImageJ e o comprimento de onda correspondente em nanômetros. O coeficiente angular (1,703) representa a taxa de variação: a cada pixel adicional, há um acréscimo de aproximadamente 1,7 nm no comprimento de onda. Já o termo independente (189,95) corresponde ao valor de λ quando $N_p = 0$, isto é, o ponto em que a escala de pixels intercepta o eixo dos comprimentos de onda.

Embora este valor inicial não represente uma medida física direta (não existe pixel “zero” visível no espectro), ele define o ajuste da reta e assegura que a calibração se mantenha consistente em toda a faixa espectral. Dessa forma, a equação fornece ao espectrômetro artesanal um mapeamento contínuo entre pixels e λ , usado para transformar dados brutos em informação espectral interpretável. Essa diferença metodológica não apenas amplia a quantidade de informações disponíveis, como também permite análises mais completas, por exemplo, da largura espectral e da presença de picos secundários.

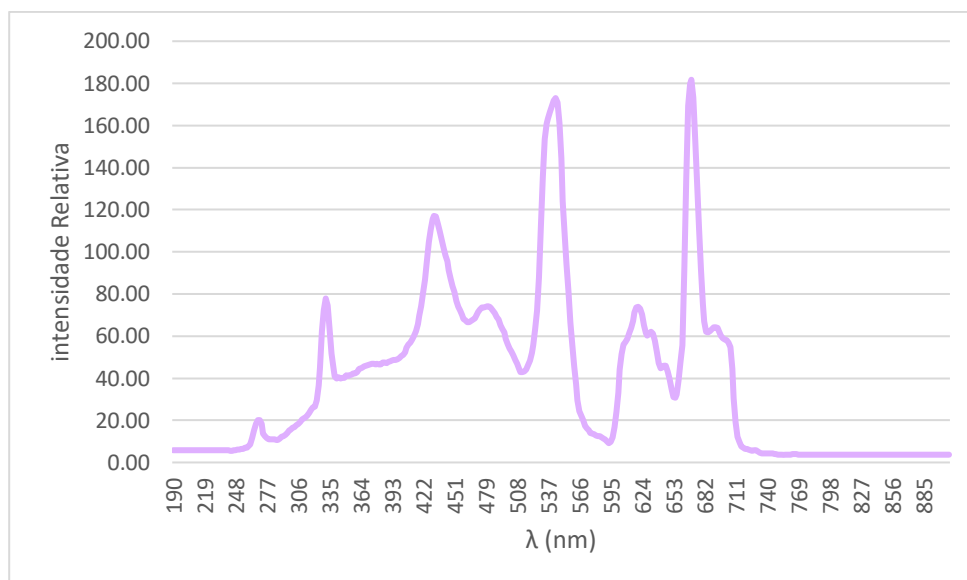
De modo geral, verificou-se que os valores obtidos pelos dois métodos apresentaram proximidade, em especial nos comprimentos de onda correspondentes aos picos mais intensos. As discrepâncias observadas, que em alguns casos atingiram algumas dezenas de nanômetros, podem ser explicadas por fatores experimentais, como o posicionamento da câmera, as variações no recorte das imagens durante a análise no ImageJ, a intensidade luminosa das fontes avaliadas ou a presença de artefatos de captura. Tais diferenças, entretanto, não comprometem a validade da metodologia, mas indicam aspectos para o seu aprimoramento.

Além disso, a abordagem utilizada oferece um ganho pedagógico expressivo, pois permite que o estudante acompanhe todo o processo de tratamento dos dados — da conversão de pixels em comprimentos de onda até a obtenção da intensidade relativa —, o que favorece a compreensão dos princípios da espectroscopia e estimula reflexões sobre calibração, precisão e limitações inerentes aos experimentos.

4.1.1 Lâmpada Fluorescente

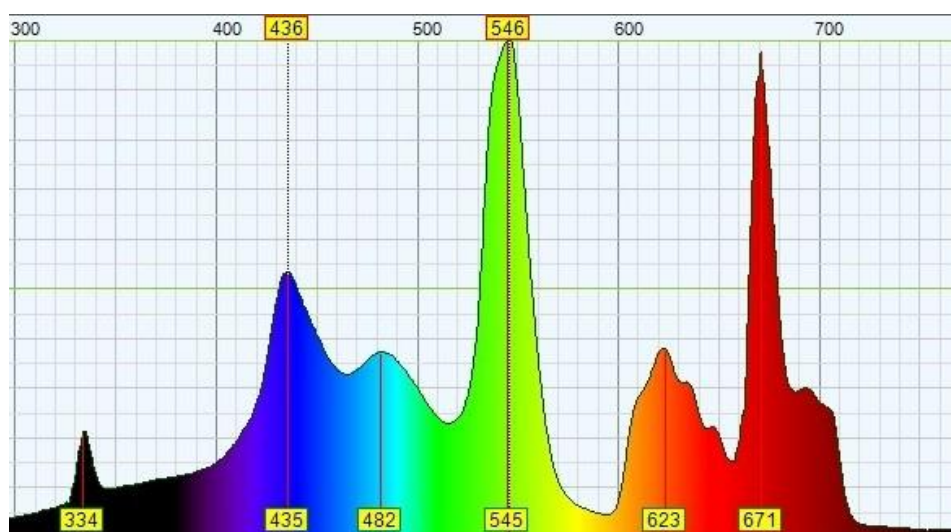
A comparação entre os espectros da lâmpada fluorescente obtidos pela metodologia proposta (Figura 22) e pelo software Theremino Spectrometer (Figura 23) mostrou uma forte correspondência. Os picos característicos apresentaram excelente concordância: o pico verde foi identificado em 546 nm em ambos os métodos sendo a intensidade relativa correspondente igual a 170,8. O pico vermelho foi detectado em 668 nm com intensidade relativa de 179,4 (nossa metodologia) versus 671 nm (TS), e o pico azul também coincidiu em 435 nm, com intensidade relativa de 113,5.

Figura 22: Gráfico Lâmpada Fluorescente sem filtro óptico — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborada pelo autor utilizando o ImageJ + Excel.

Figura 23: Perfil de onda do espectro fluorescente.



Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino Spectrometer.

4.1.2 LED de Luz Quente

Na análise do LED quente, os resultados iniciais apresentaram discrepâncias mais acentuadas em relação ao Theremino Spectrometer, especialmente quando foram utilizados filtros ópticos. O caso mais evidente ocorreu com o filtro vermelho, em que a metodologia via IJ + Excel registrou um pico deslocado em aproximadamente 100 nm em comparação ao valor indicado pelo TS.

Esse desvio foi atribuído a um artefato experimental, caracterizado pela formação de um clarão no lado esquerdo do espectro (Figura 24).

Figura 24: Artefato na coleta do espectro do LED Quente.

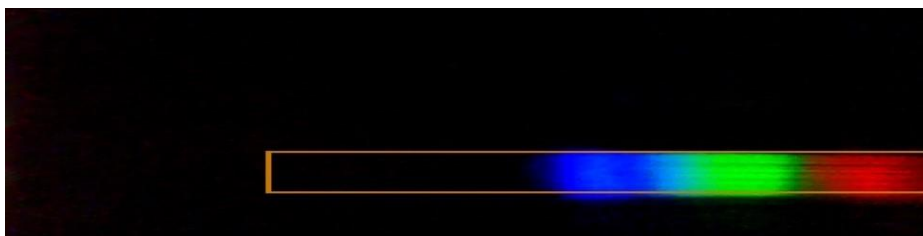


Fonte: elaborado pelo autor usando o Theremino Spectrometer.

Esse efeito luminoso alterou a interpretação do software, que passou a registrar comprimentos de onda inexistentes na região espectral correspondente. Para verificar essa hipótese, foi realizado um ajuste simples noutro aparato, afastando a webcam em relação à fenda.

Foi escolhido outro espectrômetro para capturar o espectro a seguir (Figura 25) apenas para ilustrar esta solução afim de não alterar em nada nas condições de coleta dos demais espectros no espectrômetro utilizado durante todo o trabalho.

Figura 25: Exemplo de possível solução para o artefato luminoso na detecção espectral do LED de luz quente capturado num outro espectrômetro.



Fonte: elaborado pelo autor usando o Theremino Spectrometer.

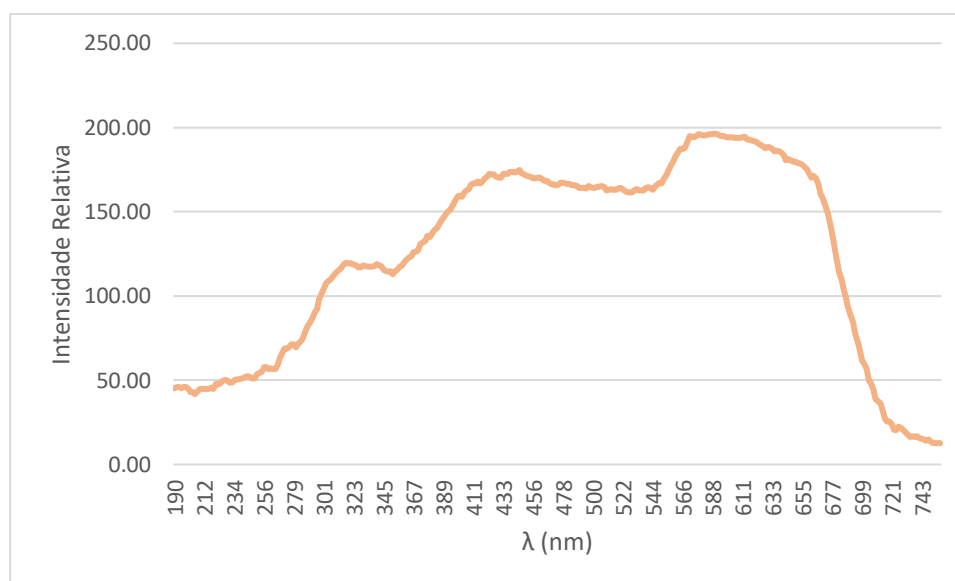
Essa modificação eliminou o clarão e estabilizou o perfil espectral, demonstrando que o problema não estava associado ao comportamento físico da fonte, mas sim à saturação do sensor da câmera e ao posicionamento no interior da caixa do espectrômetro.

Esse resultado é significativo e admite que a metodologia proposta é sensível a artefatos ópticos, mas também que esses problemas podem ser corrigidos de forma simplificada, com ajustes de distância e posicionamento. Além disso, ressalta a importância de se considerar as limitações dos detectores utilizados, especialmente em fontes de alta intensidade luminosa, como LEDs quentes, a luz solar ou mesmo

chamas de vela requerendo alguns pequenos ajustes para tais fontes. Portanto, vamos avaliar graficamente a situação do LED de luz quente.

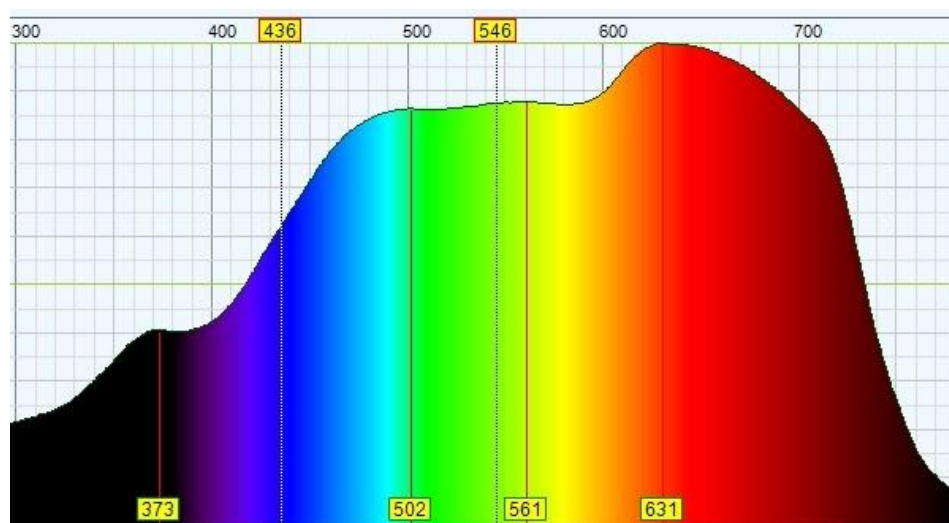
No espectro sem filtro (Figura 26), a metodologia proposta (IJ + Excel) identificou picos em 323 nm (violeta, ainda fora da faixa visível ao olho humano), 396 nm, 456 nm, 498 nm e 594 nm. Já o Theremino Spectrometer (TS) (Figura 27) registrou valores próximos: 373 nm, 436 nm, 502 nm, 546 nm, 561 nm e 631 nm, respectivamente. Essa correspondência revela uma concordância entre os dois métodos, embora o excesso de luminosidade do LED quente tenha produzido um clarão no lado esquerdo do espectro (Figura 24), dificultando a análise nessa região.

Figura 26: Gráfico LED Quente sem filtro — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborada pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Figura 27: Perfil de onda do espectro LED quente sem filtro óptico.



Fonte: elaborado pelo autor usando o Theremino Spectrometer.

Observa-se ainda que os deslocamentos entre os picos identificados pelos dois métodos mantêm certa regularidade, conforme mostrado na Tabela 3. Essa constância sugere que não se tratam apenas de erros aleatórios, mas também de fatores sistemáticos ligados ao processo de captura e análise.

Um exemplo é a ausência, no ImageJ, de um regulador que mantenha o mesmo recorte entre diferentes espectros. Assim, a troca da imagem de calibração (fluorescente) para espectros de LED quente pode comprometer a homogeneidade

dos pontos analisados, resultando em pequenos deslocamentos no gráfico gerado pela metodologia no Excel.

Tabela 3: Erro sistemático entre os λ (nm) do ImageJ + Excel com Theremino Spectrometer.

Valor de λ em IJ + Excel (nm)	Valor de λ em TS(nm)	TS - Diferença IJ + Excel (nm)
323	373	50
396	436	40
456	502	46
498	546	48
514	561	47
594	631	37
Média das diferenças:		$44,6 \pm 2,1$

Fonte: elaborado pelo autor.

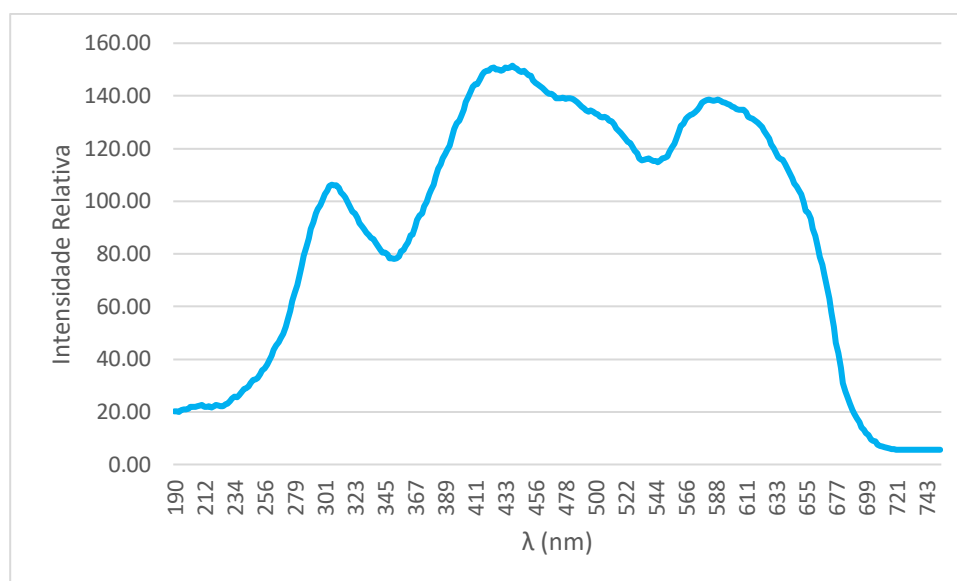
Do ponto de vista estatístico, as medidas apresentaram desvio padrão de 5,05, refletindo a dispersão dos valores obtidos em torno da média. O erro padrão da média foi de aproximadamente $\pm 2,1$, o que indica que a incerteza associada à média calculada se encontra dentro de um intervalo aceitável para experimentos de caráter artesanal.

4.1.3 LED de Luz Fria

A análise do LED frio compartilha da mesma concordância entre o Theremino Spectrometer (TS) e a metodologia ImageJ + Excel (IJ) analisados no LED quente. A metodologia alternativa (Figura 28) identificou picos em 313, 386, 442, 486 e 597 nm, enquanto o TS (Figura 29) registrou valores em 357, 436, 495, 546 e 634 nm, respectivamente

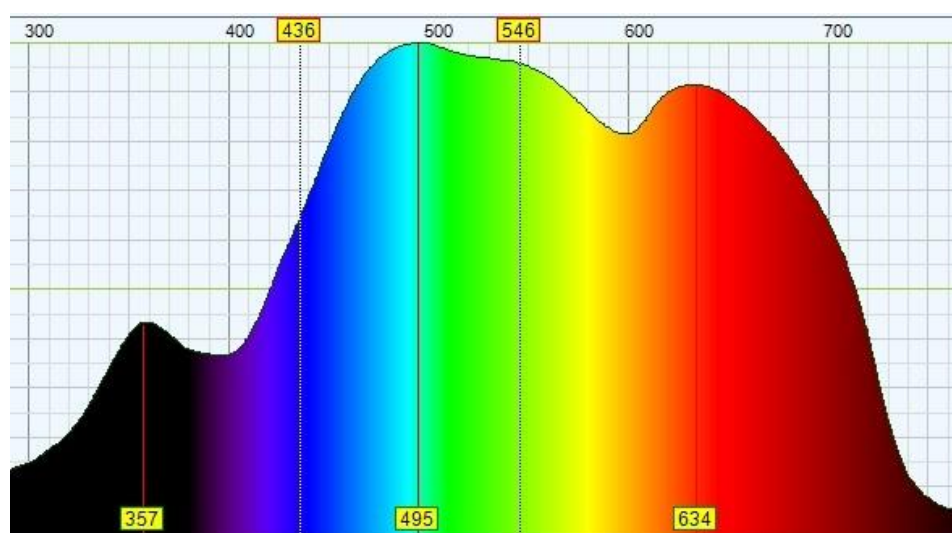
Essas diferenças podem ser atribuídas a fatores sistemáticos, como o processo de captura das imagens no IJ, embora não comprometam a validade da metodologia. Pelo contrário, atuam reforçando sua utilidade ao permitir a construção de perfis espectrais completos, em contraste com a limitação do TS, que privilegia apenas os picos mais evidentes.

Figura 28: Gráfico LED frio sem filtro — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Figura 29: Perfil de onda do espectro LED de luz fria sem filtro óptico.



Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino.

Os deslocamentos observados entre os dois métodos mantêm uma média de 46,8 nm, com desvio padrão de 9,2 nm e erro médio de $\pm 3,7$ nm, (Tabela 4) o que sugere um padrão relativamente estável de discrepâncias. Assim, a análise do LED frio evidencia que, embora haja um deslocamento sistemático entre os picos identificados pelos dois métodos, o perfil geral do espectro é mantido.

Esse comportamento reforça a validade da metodologia artesanal, ainda que com discrepâncias regulares de algumas dezenas de nanômetros. Observa-se, portanto, que a abordagem proposta não apenas acompanha a estrutura espectral

principal, mas também destaca detalhes adicionais que enriquecem a interpretação dos dados.

Tabela 4: Erro sistemático entre os λ (nm) do ImageJ + Excel com Thermanino Spectrometer.

Valor de λ em IJ + Excel (nm)	Valor de λ em TS(nm)	TS - Diferença IJ + Excel (nm)
313	357	44
386	436	50
442	495	53
486	546	60
597	634	37
594	631	37
Média das diferenças:		$46,8 \pm 3,75$

Fonte: elaborado pelo autor.

Dando sequência, na seção seguinte (4.2), serão apresentados e discutidos os espectros obtidos com a utilização dos filtros ópticos da CIDEPE, cuja aplicação permite verificar a seletividade espectral do sistema e avaliar a consistência dos resultados frente à transmissão controlada de determinadas faixas de comprimento de onda.

4.2 ESPECTROS DOS FILTROS ÓPTICOS DA CIDEPE

Diferentemente da análise realizada para as lâmpadas sem filtros, não será necessário repetir o procedimento comparativo ponto a ponto entre os métodos (como nas Tabelas 3 e 4), uma vez que o padrão de deslocamento espectral já foi devidamente caracterizado e não traria novidades relevantes. No caso dos filtros, o enfoque será distinto: busca-se compreender como cada elemento modifica a intensidade relativa transmitida e absorvida nas diferentes regiões do espectro visível.

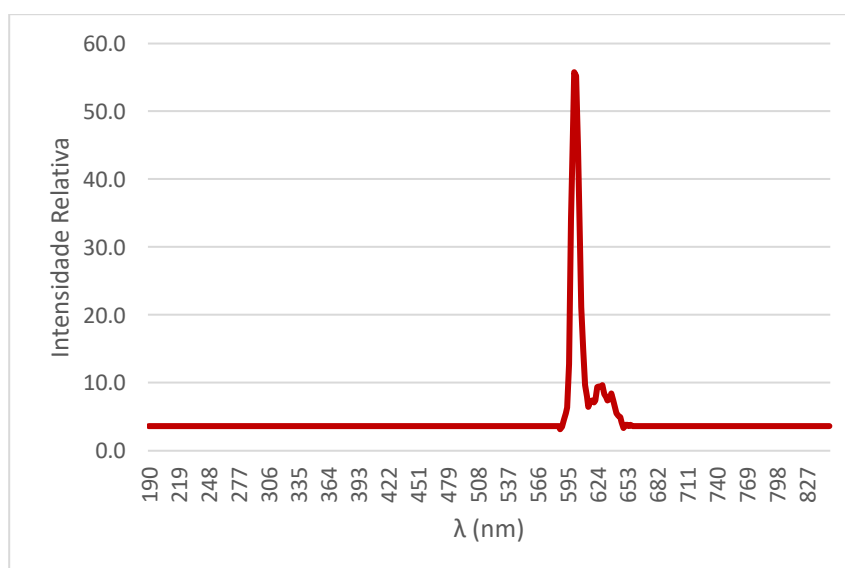
Para isso, serão estimados a fração de absorção da luz desprezando a reflexão, a partir de comprimentos de onda de referência — especialmente aqueles em que se observa maior atenuação em relação ao espectro sem filtro. Assim, por exemplo, no filtro azul espera-se maior absorção nas regiões do verde e do vermelho, enquanto no filtro vermelho o efeito se concentrará no azul e no verde.

Os valores serão apresentados em termos percentuais, o que permitirá discutir a seletividade espectral de cada filtro e sua coerência com as expectativas teóricas. É importante evidenciar: o pico de intensidade não aumentou nem diminuiu no eixo das ordenadas, ele apenas se desloca diante das abscissas devido a fatores já comentados, mantendo o mesmo valor.

4.2.1 Lâmpada Fluorescente + Filtros Ópticos CIDEPE

A aplicação de filtros ópticos permitiu aprofundar a comparação entre as metodologias, corroborando a correspondência geral entre os métodos, ainda que com discrepâncias residuais. Conforme ilustrado nas imagens a seguir, a utilização do filtro vermelho resultou em um desvio no perfil espectral: a metodologia proposta registrou seu máximo em 604 nm (Figura 30) enquanto o software Theremino Spectrometer (TS) manteve o pico característico em 671 nm (Figura 31). Este deslocamento é atribuível a uma combinação de limitações instrumentais e à diferença fundamental na abordagem de captura e processamento de dados entre os sistemas.

Figura 30: Gráfico Lâmpada fluorescente filtro vermelho — λ (nm) x Intensidade Relativa.

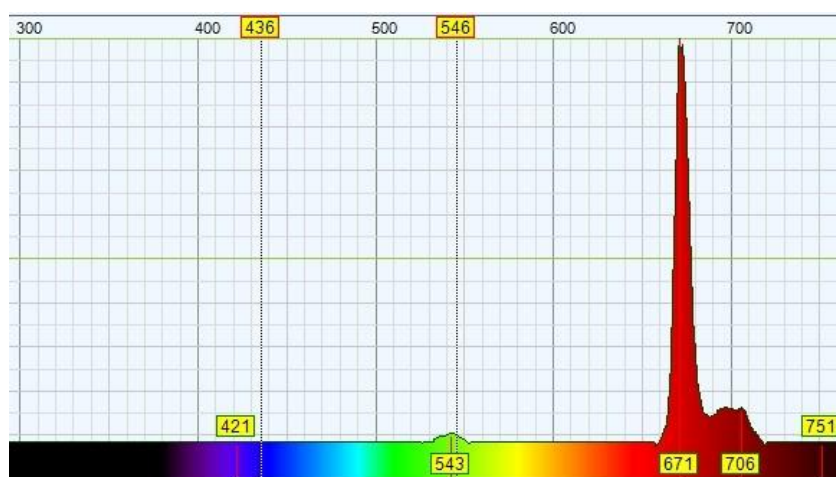


Fonte: elaborada pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Para quantificar o efeito de absorção do filtro, aplicou-se a equação (10). Considerando a intensidade relativa do pico vermelho na condição sem filtro como $I_0 = 179,4$ e a intensidade com filtro como $I = 55,2$, foi possível determinar o índice de absorvância para este comprimento de onda.

Ademais, observou-se a efetiva supressão dos demais picos: os valores de intensidade dos picos verde e azul, originalmente em 170,8 e 113,5 respectivamente, foram reduzidos para aproximadamente 3,7 na presença do filtro, demonstrando sua seletividade.

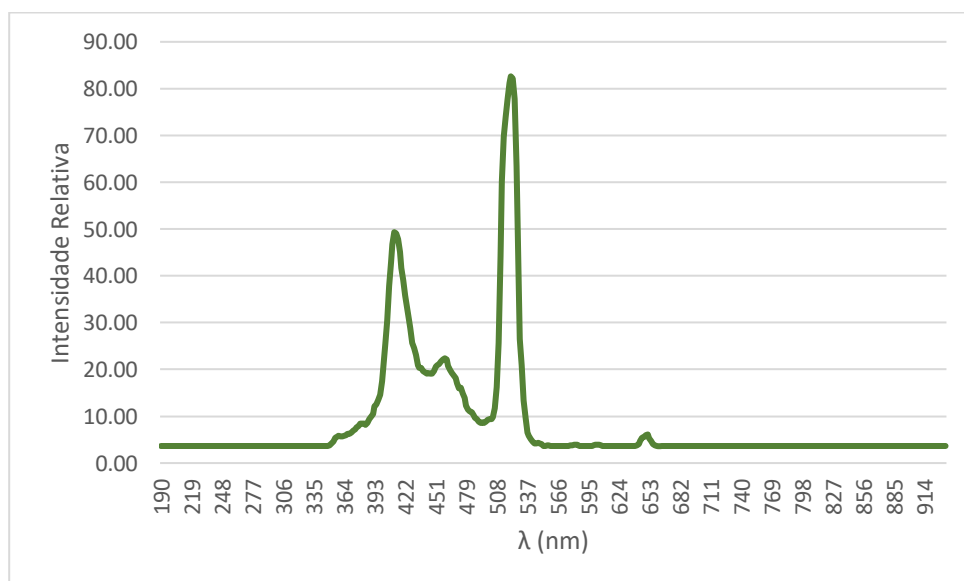
Figura 31: Perfil de onda do espectro fluorescente com filtro óptico vermelho.



Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino Spectrometer.

Quando utilizado o filtro verde, no ImageJ + Excel, observou-se 415 nm (intensidade relativa $\approx 47,8$), 524 nm (intensidade relativa ≈ 82) e 651 nm (intensidade relativa $\approx 6,13$) conforme Figura 32.

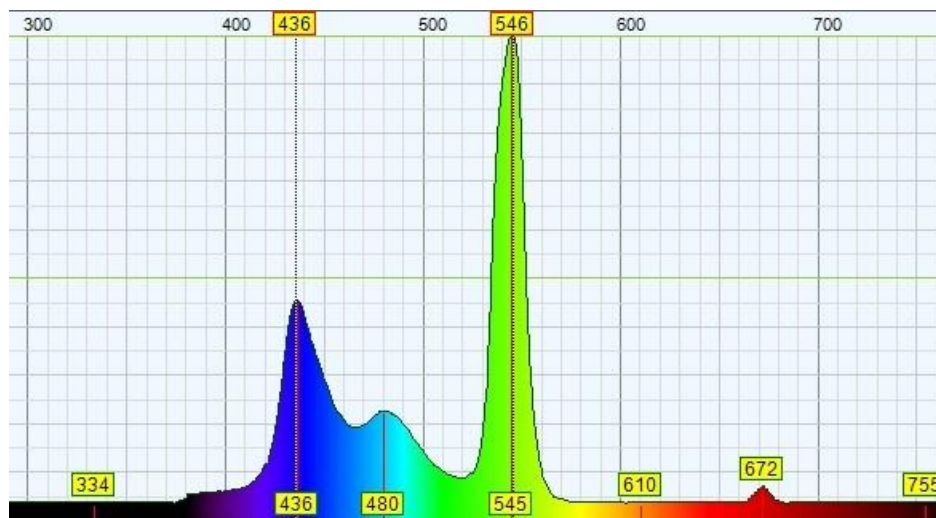
Figura 32: Gráfico Lâmpada fluorescente com filtro verde — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Já o Theremino identificou picos em 436 nm, 546 nm e 672 nm, valores bastante próximos (Figura 33).

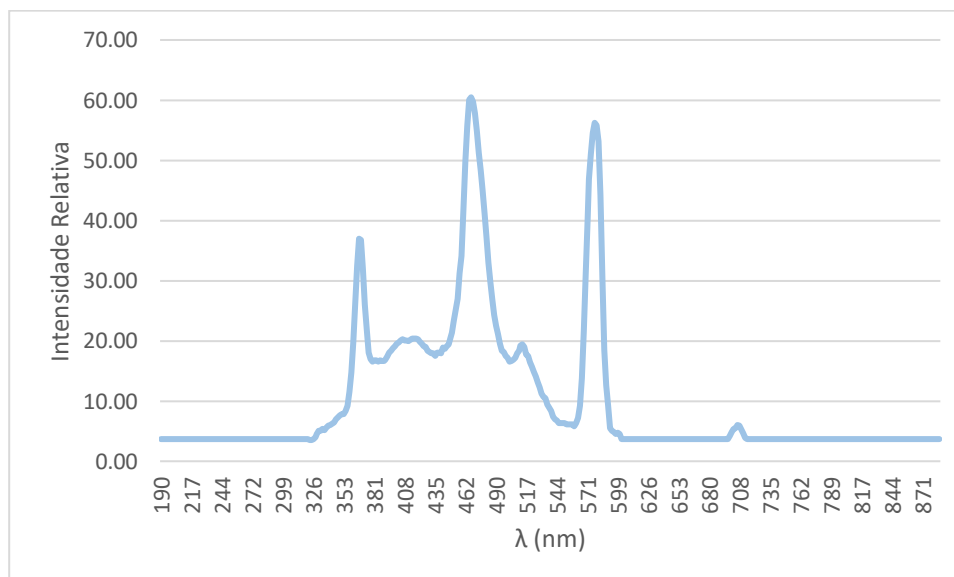
Figura 33: Perfil de onda do espectro fluorescente com filtro óptico verde.



Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino Spectrometer.

Com o filtro azul, nossa metodologia registrou 469 nm (59,8), 580 nm (55,8) e 704 nm (5,45), também dentro de um intervalo aceitável

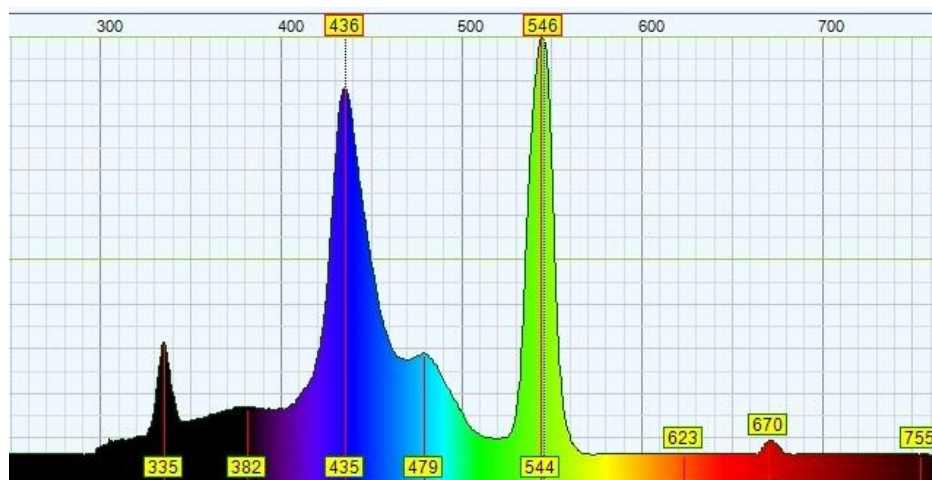
Figura 34: Gráfico Lâmpada fluorescente com filtro azul — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Ao passo que o Theremino, conforme Figura 35) acusou picos em 436 nm, 546 nm e 670 nm.

Figura 35: Perfil de onda do espectro fluorescente com filtro óptico azul.

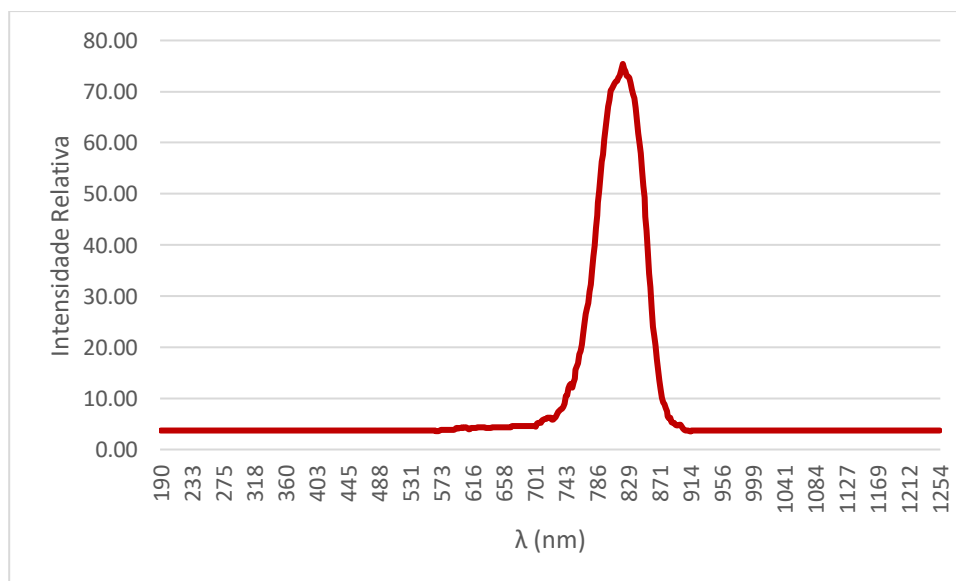


Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino Spectrometer.

4.2.2 Lâmpada LED Luz Quente + Filtros Ópticos CIDEPE

Com o filtro vermelho, o Theremino registrou o pico esperado em 690 nm, enquanto o ImageJ deslocou-o para 862 nm com 74 de intensidade relativa (Figuras 36-37), erro evidente da metodologia artesanal. Esse desvio de mais de 100 nm decorreu do clarão gerado pela alta intensidade da fonte (Figura 24), que fez o programa interpretar como espectro uma região saturada, deslocando artificialmente o pico principal.

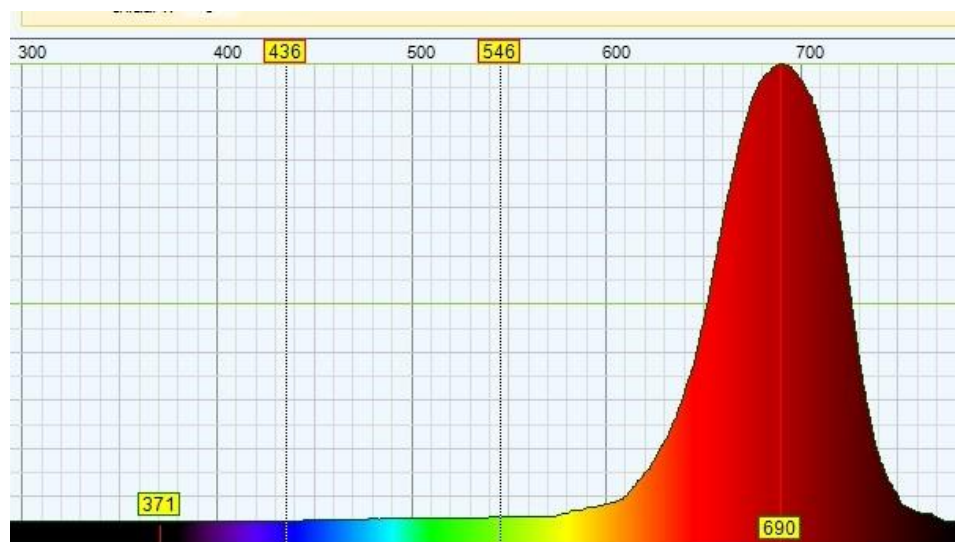
Figura 36: Gráfico LED Quente com filtro vermelho — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborada pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Ao que se refere as cores verde e azul, não apresentam picos, se mantendo junto as demais intensidades iguais a 3,67 fora do intervalo que diz respeito a cor vermelha.

Figura 37: Perfil de onda do espectro LED quente com filtro óptico vermelho.



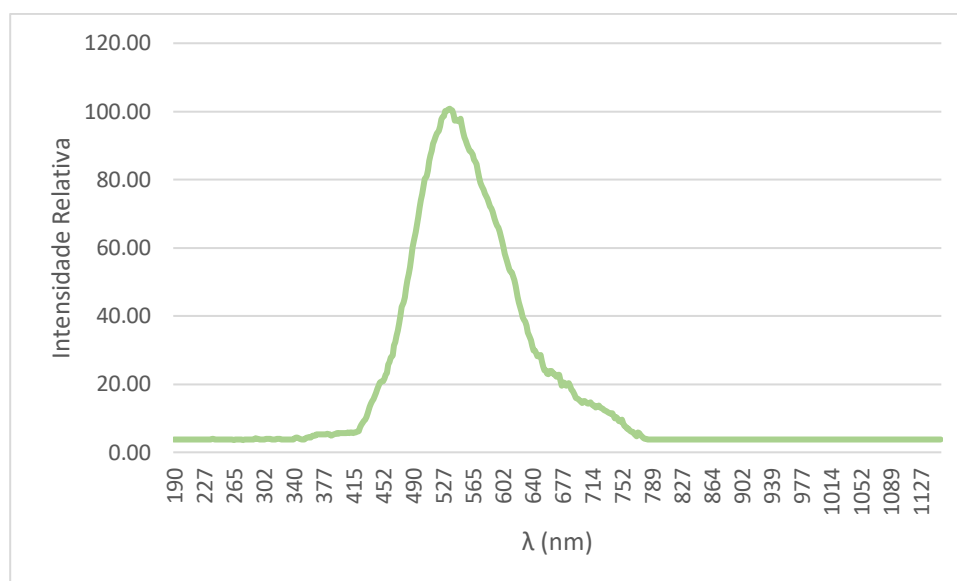
Fonte: elaborado pelo autor usando o Theremino Spectrometer.

No caso do filtro verde, observou-se correspondência parcial entre os métodos: o Theremino identificou o pico em 488 nm, enquanto o ImageJ registrou 539 nm, com intensidade relativa de 100,5 (Figura 38). O deslocamento entre os valores reflete a influência da saturação do LED quente, associada à ausência de padronização no recorte das imagens durante a troca de espectros no IJ.

Esse efeito, somado à alta luminosidade da fonte, distorceu a correspondência entre as leituras. O resultado indica a necessidade de ajustes experimentais para esse tipo de fonte, como a utilização de filtros adicionais de atenuação para reduzir a intensidade da luz incidente ou, a já testada, melhorar a posição webcam em no momento da calibração.

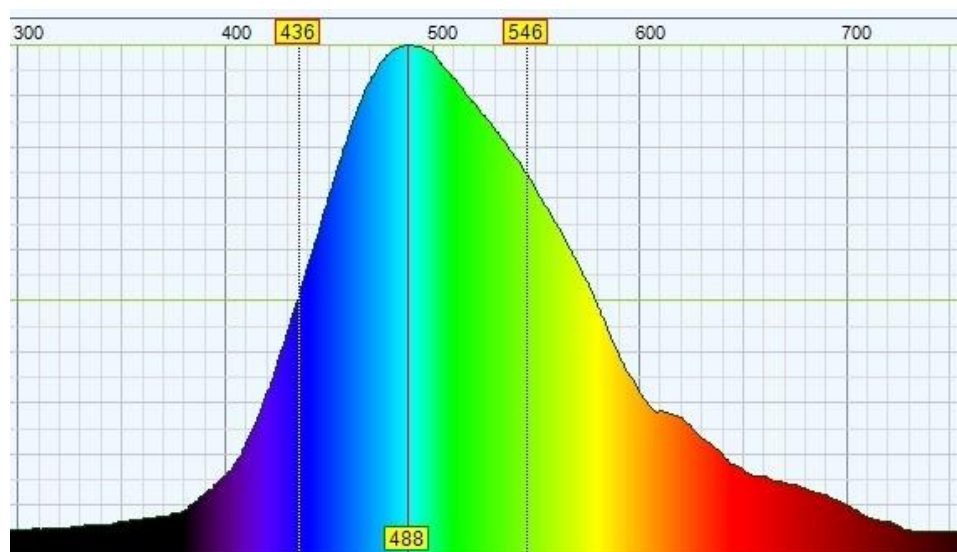
Nos demais pontos do espectro analisado (Figura 39), o Theremino não registrou variações significativas, mantendo todos os valores próximos de uma intensidade de 3,67. Assim como ocorreu no caso do filtro vermelho, o perfil permaneceu praticamente plano, sem a indicação de picos adicionais detectáveis pelo instrumento.

Figura 38: Gráfico LED Quente com filtro verde — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborada pelo autor usando o ImageJ + Excel.

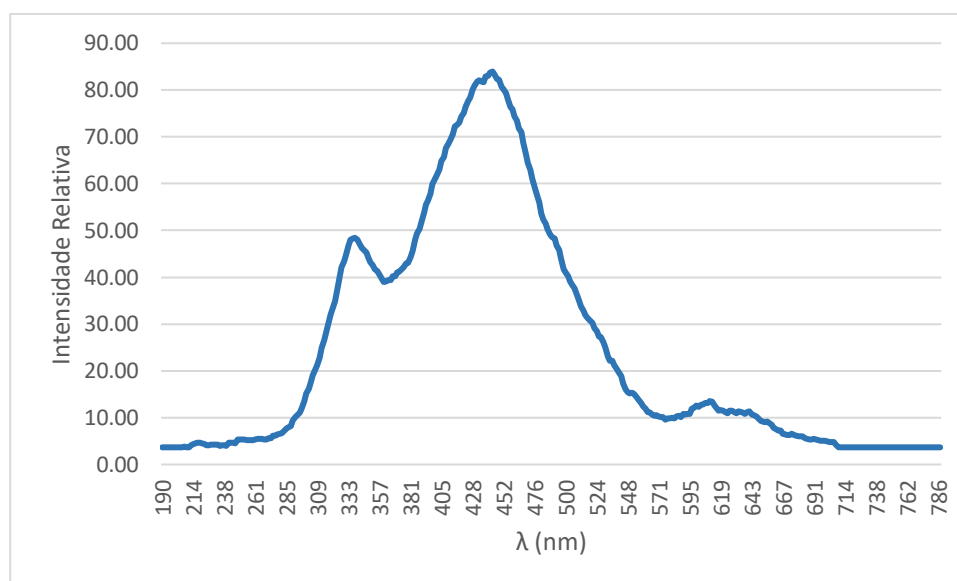
Figura 39: Perfil de onda do espectro LED quente com filtro óptico verde.



Fonte: elaborado pelo autor usando o Theremino Spectrometer.

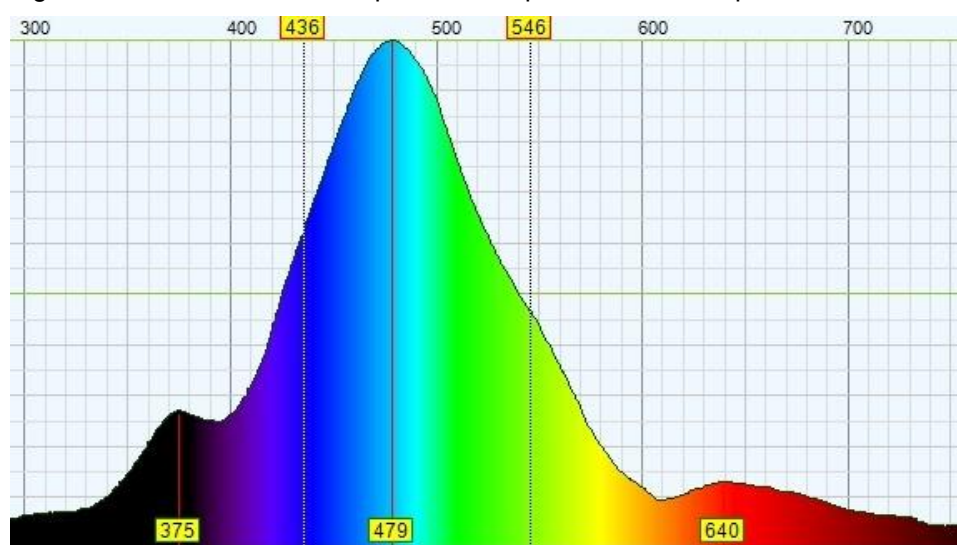
Com o filtro azul, a concordância entre os métodos mostrou-se mais evidente. O ImageJ + Excel identificou picos em 346 nm, 493 nm, 495 nm e 614 nm, com intensidades relativas de 83,33, 46,76 e 12,69 para os três últimos. Um aspecto relevante é que ambos os métodos registraram ainda um pequeno pico na região do vermelho — em torno de 610 nm (Figura 40) e 640 nm (Figura 41) — mesmo sob filtragem azul, indicando a presença de componentes residuais da fonte luminosa. O Theremino registrou picos em 375 nm, e 479 nm, 546 nm e 640 nm.

Figura 40: Gráfico LED Quente com filtro azul — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborada pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Figura 41: Perfil de onda do espectro LED quente com filtro óptico azul.



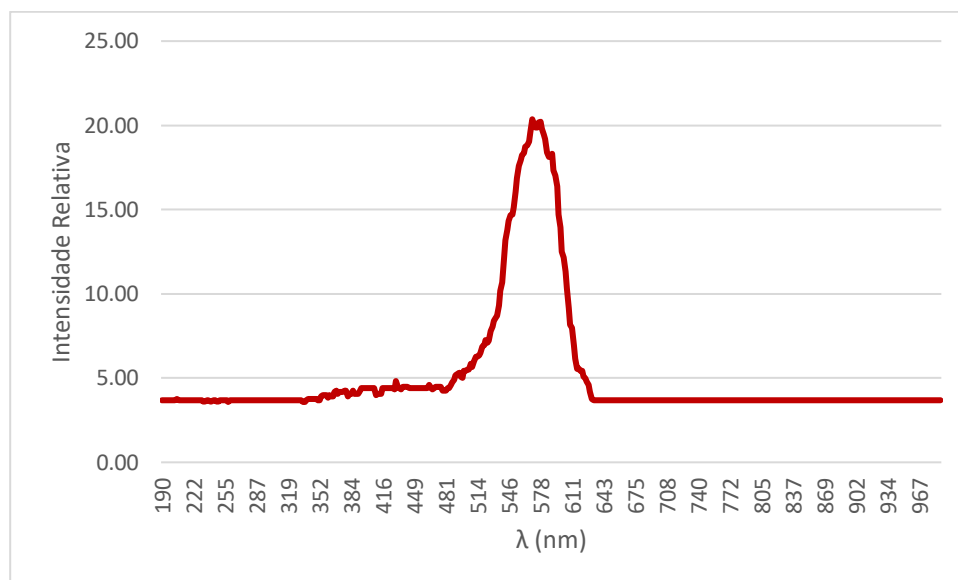
Fonte: elaborado pelo autor usando o Theremino Spectrometer.

4.2.3 Lâmpada LED Luz Fria + Filtros Ópticos CIDEPE

A aplicação dos filtros ópticos evidenciou deslocamentos próximos de 100 nm em relação ao espectro de calibragem fluorescente e aos demais espectros avaliados. Com o filtro vermelho, o pico predominante no método IJ + Excel surgiu em 575 nm, com intensidade relativa de 19,86 (Figura 42), valor significativamente inferior ao observado em outros espectros, já que o LED analisado não apresenta forte

componente vermelha. Além disso, foram identificados pequenos picos em 434 nm e 400 nm, associados às regiões do violeta, com intensidades de 4,5 e 4,0, respectivamente.

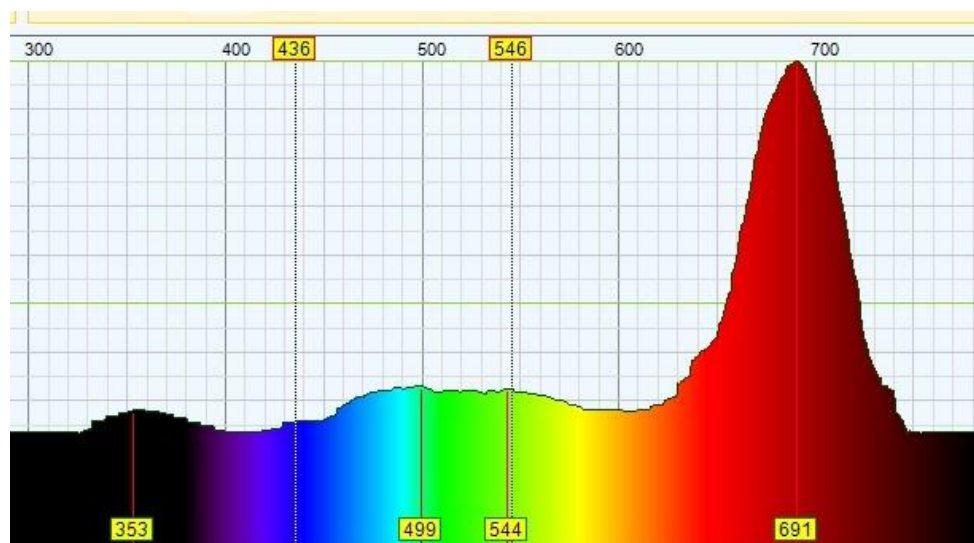
Figura 42: Gráfico LED frio filtro óptico vermelho — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ + Excel.

No caso do TS (Figura 43), o pico principal permaneceu na faixa do vermelho (691 nm), acompanhado de atenuações parciais em torno de 499 nm e 544 nm, possivelmente relacionadas a artefatos de captura luminosa.

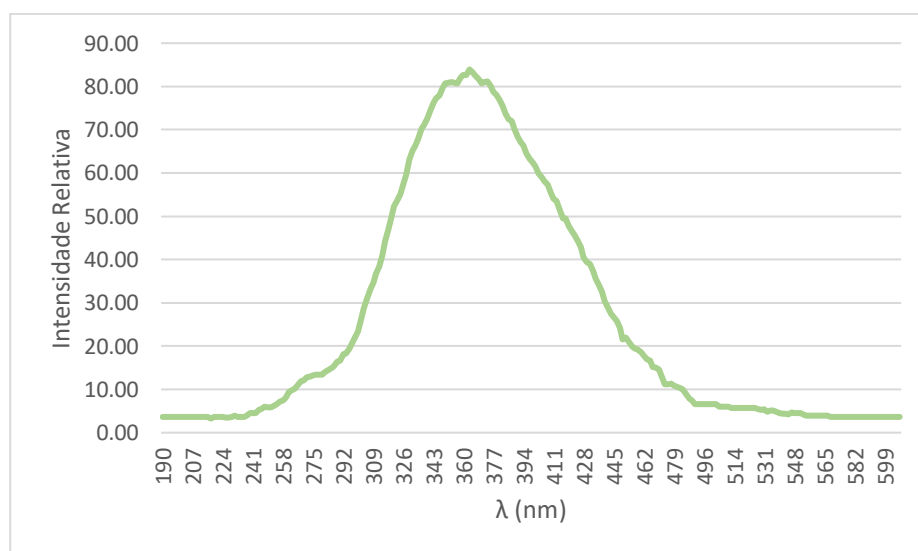
Figura 43: Perfil de onda do espectro do LED frio com filtro óptico vermelho.



Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino.

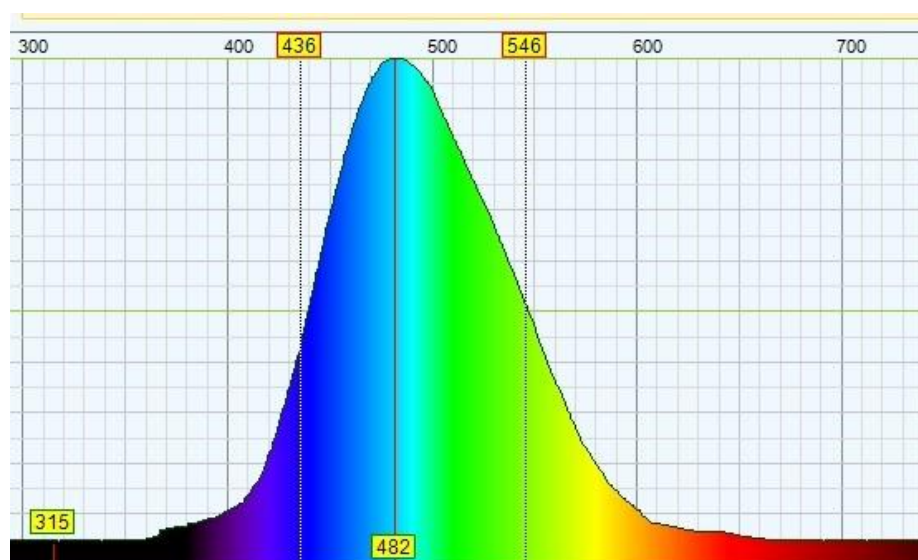
O método IJ + Excel identificou um pico em 364 nm, com intensidade relativa de 83,93 (Figura 44), correspondente ao pico em 482 nm registrado pelo TS (Figura 45). Esse resultado confirma novamente o deslocamento persistente de aproximadamente 100 nm no eixo dos comprimentos de onda (λ), associado ao recorte não padronizado entre as imagens analisadas no ImageJ. Além disso, observou-se, na região intermediária do espectro, intensidades relevantes nas faixas do azul e do vermelho, registradas em 41 e 5,27, respectivamente, embora sem novos picos bem definidos.

Figura 44: Gráfico LED frio filtro verde — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ + Excel.

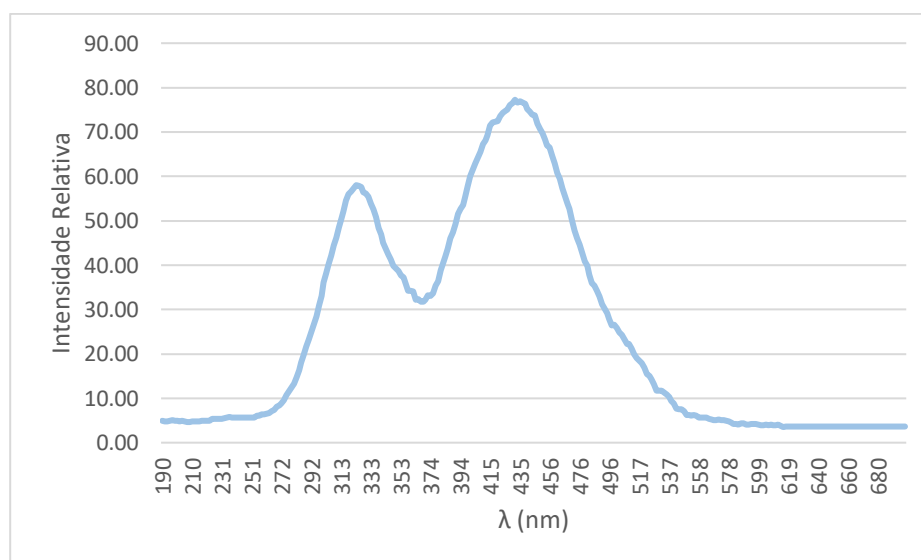
Figura 45: Perfil de onda do espectro do LED frio com filtro óptico verde.



Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino.

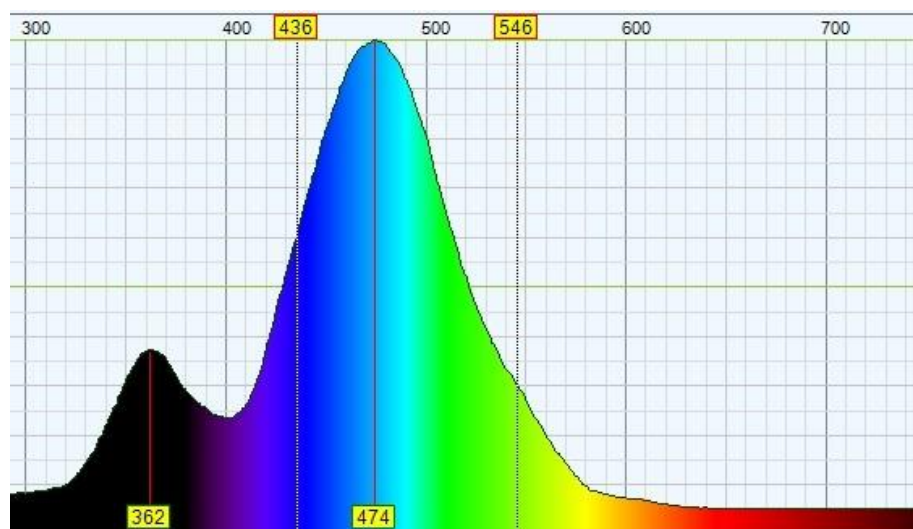
O IJ + Excel registrou picos em 328 nm (intensidade $\approx 56,2$), 447 nm ($\approx 76,69$) e 495 nm ($\approx 29,21$). Embora o primeiro pico identificado pelo TS (362 nm) não seja visualmente destacado, aparece como correspondente ao deslocamento característico entre os métodos. Na região do vermelho, não foram observados picos no IJ + Excel, apenas uma intensidade residual em torno de 3,67, refletindo a atenuação nessa faixa. Com o filtro azul, o TS acusou máximos em 362 nm, 474 nm e 546 nm, reforçando a tendência já observada de persistência de múltiplos componentes espectrais, mesmo sob filtragem seletiva.

Figura 46: Gráfico LED frio filtro azul — λ (nm) x Intensidade Relativa.



Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ + Excel.

Figura 47: Perfil de onda do espectro do LED frio com filtro óptico azul.



Fonte: elaborada pelo autor usando Theremino.

4.2.4 Coeficiente de Absorção por Intensidade Relativa

Uma vez determinadas as intensidades relativas para cada um dos três filtros, tornou-se necessário avaliar a fração de absorção, tomando como referência as intensidades iniciais do caso sem filtro, que representam I_0 . Para isso, aplicaram-se 27 expressões da equação (10), correspondentes a todas as configurações do experimento com filtros ópticos.

Em cada lâmpada (fluorescente, LED frio e LED quente) foram avaliados três filtros (vermelho, verde e azul), e em cada filtro consideraram-se os picos associados às regiões vermelho, verde e azul do espectro. Assim, a Tabela 5 reúne os valores de intensidade I_0 , obtidos a partir dos espectros sem filtro (Figura 16-B), e os valores de I , referentes às medições com filtros (Figuras da seção 4.2).

A partir da relação encontrada em (10), multiplicada por 100, foi possível expressar os coeficientes de absorção em percentuais, permitindo uma análise comparativa do comportamento de cada filtro para as diferentes fontes luminosas.

Tabela 5: Intensidades Relativas (IR) da luz incidente I_0 das lâmpadas fluorescente e LEDs sem filtros junto as Intensidades Relativas transmitidas (I) para cada lâmpada em diferentes filtros.

Lâmpada		IR na faixa do Vermelho	IR na faixa do Verde	IR na faixa do Azul
Fluorescente	Sem Filtro (I_0)	179,40	170,80	113,50
	Filtro Vermelho	55,20	3,70	3,70
	Filtro Verde	6,13	82,00	47,80
	Filtro Azul	5,45	55,80	59,80
LED quente	Sem Filtro (I_0)	194,80	163,70	150,20
	Filtro Vermelho	74,00	3,67	3,67
	Filtro Verde	3,67	100,50	3,67
	Filtro Azul	12,70	46,80	83,30
LED frio	Sem Filtro (I_0)	136,80	139,90	114,00
	Filtro Vermelho	19,90	4,50	4,00
	Filtro Verde	5,27	83,90	41,10
	Filtro Azul	3,67	29,20	76,70

Fonte: elaborada pelo autor.

Essas intensidades relativas transmitidas (I) para cada uma das três lâmpadas avaliadas — fluorescente, LED quente e LED frio — em três condições distintas de filtragem (vermelho, verde e azul) representam os valores obtidos após a passagem da luz por cada filtro, permitindo comparar o grau de transmissão em diferentes regiões do espectro.

Na lâmpada fluorescente, observa-se que cada filtro atua seletivamente, transmitindo preferencialmente a cor correspondente. Por exemplo, o filtro verde permite elevada transmissão na região do verde (82,0), enquanto reduz significativamente a passagem nas regiões vermelha e azul. O mesmo comportamento é verificado para os filtros vermelho e azul, confirmando sua seletividade, ainda que com algum grau de transmissão residual em outras faixas.

No caso do LED quente, o padrão é semelhante, porém com valores de transmissão mais concentrados no vermelho (194,80) e com filtro vermelho a intensidade foi reduzida a 74,00. Esse resultado é coerente com a natureza espectral do LED quente, cuja emissão apresenta forte componente na região amarelada-envermelhada, favorecendo a passagem através de comprimentos nesta região do espectro.

Já o LED frio apresenta uma resposta distinta: o filtro azul transmite a maior intensidade (76,7), coerente com a predominância da radiação azul em seu espectro. O filtro verde também apresentou transmissão relevante (83,9), enquanto o filtro vermelho exibiu valores bastante reduzidos, confirmando a menor contribuição dessa faixa espectral na emissão do LED frio.

De modo geral, a Tabela 6 mostra que os filtros ópticos atuam de maneira consistente com suas faixas de transmissão esperadas, mas também revelam a presença de componentes residuais em outras regiões do espectro. Essa análise é fundamental para a etapa seguinte, na qual se avalia a fração de absorção de cada filtro em relação às intensidades iniciais sem filtragem.

A Tabela 6 apresenta, portanto, os percentuais de transmissão e absorção obtidos para cada filtro aplicado às três lâmpadas estudadas (fluorescente, LED quente e LED frio). Esses valores foram calculados a partir da relação entre a intensidade transmitida (I) e a intensidade incidente sem filtro (I_0), conforme a equação (10), multiplicada por 100, convertendo os resultados em percentuais de transmissão e absorção. Ressalta-se que as duas grandezas são complementares: a fração não

absorvida é transmitida, e vice-versa. Por esse motivo, apenas um dos índices é apresentado na tabela a seguir.

Tabela 6: Percentuais de transmissão (e, de forma implícita, absorção) da luz para a fração de absorção (α) em cada filtro.

Lâmpadas	Filtros	(%) Luz Vermelha de Transmitida	(%) Luz Verde Transmitida	(%) Luz Azul de Transmitida
Fluorescente	Vermelho	30,70	02,20	02,70
	Verde	03,42	48,00	42,10
	Azul	03,00	32,70	53,00
LED Quente	Vermelho	37,90	02,30	02,40
	Verde	01,90	61,40	02,40
	Azul	06,50	28,60	55,50
LED Frio	Vermelho	14,50	03,20	03,50
	Verde	03,80	59,90	36,00
	Azul	02,70	20,80	67,20

Fonte: elaborada pelo autor.

A análise dos valores confirma a seletividade característica de cada filtro óptico. No caso da lâmpada fluorescente, verifica-se que o filtro vermelho permitiu a transmissão de aproximadamente 30% da componente vermelha, enquanto bloqueou mais de 97% das radiações verde e azul. O filtro verde, por sua vez, apresentou transmissão de 48% na região espectral correspondente, com significativa atenuação das demais faixas. O filtro azul registrou transmissão de 53% para sua respectiva faixa, associada a elevada absorção das demais componentes.

No LED quente, observa-se comportamento semelhante, porém com particularidades: o filtro verde apresentou transmissão de 61,4% na região verde, confirmando a predominância espectral desta fonte nesse comprimento de onda, enquanto praticamente suprimiu as componentes vermelha e azul. O filtro vermelho permitiu transmissão de aproximadamente 38% da radiação vermelha, com redução acentuada das demais regiões.

Para o LED frio, constata-se que o filtro azul registrou a maior transmissão entre todos os casos analisados (67,2%), compatível com a conhecida predominância da componente azul no espectro desta fonte. Em contrapartida, o filtro vermelho

apresentou elevada absorção, permitindo apenas 14,5% de transmissão na faixa vermelha.

Os resultados demonstram que, embora os filtros ópticos não apresentem comportamento ideal — evidenciado pela transmissão residual em regiões espectrais não correspondentes —, a análise quantitativa confirma sua capacidade de modulação espectral, ressaltando a relevância de considerar a absorção seletiva em experimentos didáticos e aplicações tecnológicas.

4.3 AVALIANDO RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos com a metodologia artesanal (ImageJ + Excel) mostrou-se satisfatória em relação ao espectrômetro Theremino (TS), ainda que com deslocamentos sistemáticos de dezenas de nanômetros entre os picos identificados. Como discutido nas Tabelas 3 e 4, tais discrepâncias se mantiveram regulares, sugerindo a presença de fatores experimentais relacionados ao recorte das imagens no ImageJ e à intensidade luminosa das fontes. Apesar disso, o perfil geral dos espectros foi preservado, e os picos característicos das lâmpadas fluorescentes e LEDs foram devidamente identificados em ambos os métodos.

Nos casos com filtros ópticos, o procedimento adotado se diferenciou: em vez de repetir a comparação ponto a ponto entre picos, avaliou-se a transmissão e a absorção relativa das regiões espectrais vermelha, verde e azul. Como apresentado nas Tabelas 5 e 6, os resultados confirmaram o comportamento seletivo esperado dos filtros, ainda que com transmissões residuais em faixas indesejadas. Isso demonstra que, embora não ideais, os filtros atuam de forma previsível e coerente com a teoria, permitindo verificar experimentalmente conceitos fundamentais de óptica.

Do ponto de vista didático, a principal contribuição do trabalho está em tornar visível e manipulável todo o processo: desde a calibração inicial dos pixels até a conversão em comprimentos de onda e intensidades relativas, passando pela análise quantitativa da absorção de filtros. Essa abordagem permite não apenas a validação experimental em relação a um espectrômetro convencional, mas também a criação de um caminho de aprendizagem mais completo, no qual estudantes podem observar, discutir e até calcular fenômenos como dispersão, resolução, transmissão e absorção em situações reais de laboratório.

Por fim, cabe destacar que a metodologia proposta não busca substituir equipamentos profissionais, mas sim oferecer uma alternativa acessível e eficaz para a experimentação em espectroscopia. Os deslocamentos observados, embora presentes, não comprometeram a interpretação física dos resultados. Pelo contrário, revelaram as limitações práticas de um arranjo experimental artesanal e, ao mesmo tempo, abriram espaço para discussões sobre calibração, precisão e fontes de erro em medições científicas.

Em síntese, a análise conjunta dos resultados evidencia que a metodologia artesanal baseada em ImageJ e Excel é capaz de reproduzir com alguma fidelidade o comportamento espectral de diferentes fontes de luz, apresentando coerência tanto na identificação dos picos principais quanto na avaliação do efeito seletivo dos filtros ópticos. Os deslocamentos observados nos comprimentos de onda, embora recorrentes, mostraram-se regulares e compreensíveis a partir das condições experimentais, não comprometendo a interpretação dos fenômenos.

Ao incorporar também o cálculo da transmissão e da absorção, o trabalho ampliou sua contribuição didática, oferecendo não apenas uma comparação entre métodos, mas também a possibilidade de explorar quantitativamente como diferentes elementos ópticos modulam a passagem da luz em distintas regiões do espectro visível. Essa etapa reforça o caráter pedagógico da proposta, pois permite ao estudante compreender, de forma prática, conceitos fundamentais de espectroscopia, como seletividade, absorção e coerência entre teoria e experimento.

Dessa forma, a seção 4.3 encerra a avaliação dos resultados obtidos, mostrando que tanto as lâmpadas analisadas sem filtros quanto os arranjos com filtros ópticos revelaram a consistência geral da metodologia proposta e a sua capacidade de evidenciar fenômenos espectrais de maneira didática. Com base nesses achados, é possível avançar para a etapa final deste trabalho, onde se apresentam as conclusões gerais e as perspectivas para aplicações e aperfeiçoamentos futuros.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho desenvolveu e avaliou uma metodologia em espectroscopia artesanal para análise espectral, baseada na utilização conjunta do software ImageJ e de planilhas no Excel, comparada aos resultados obtidos pelo Thermo Spectrometer. O objetivo foi verificar a viabilidade de um sistema de baixo custo para o estudo didático da espectroscopia óptica no visível.

Os resultados indicaram que a metodologia permitiu identificar picos espectrais com boa concordância em relação ao método de referência, especialmente para a lâmpada fluorescente, apresentando erros sistemáticos em torno de 45 nm. Para o LED de luz quente, observou-se maior sensibilidade a artefatos ópticos devido à saturação do sensor, embora os padrões gerais de emissão tenham sido mantidos. A análise com filtros ópticos evidenciou a seletividade espectral dos elementos e possibilitou o cálculo simplificado de coeficientes de absorção e transmissão, contribuindo para a compreensão da interação luz-matéria.

Conclui-se que a metodologia é viável e adequada a aplicações didáticas, permitindo a observação e quantificação de fenômenos espectroscópicos com recursos acessíveis. As etapas de montagem, medição e interpretação mostraram-se integradas, favorecendo o estudo experimental de conceitos de óptica e espectroscopia.

Como perspectivas, propõe-se a aplicação do espectrômetro em aulas práticas, a análise de novas fontes luminosas (solar, laser, telas RGB), o desenvolvimento de um software de calibração automática e versões compactas para uso itinerante. Recomenda-se também a normalização das intensidades e o uso de sensores mais sensíveis, a fim de reduzir deslocamentos espectrais e melhorar a precisão.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. L.; SOUSA, A. K. S.; CASTRO, T. J. **Espectroscopia Óptica de Baixo Custo: Uma Estratégia Para a Introdução de Conceitos de Física Quântica no Ensino Médio**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 41, n. 4, p. e20180349, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0349> Acesso em 02 out. 2025.
- BERTIE, John E. **Glossary of Terms Used in Vibrational Spectroscopy**. In: MANTHORPE, Peter R.; CHALMERS, John M.; GRIFFITHS, Peter R. (eds.). Handbook of Vibrational Spectroscopy. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. p. 3746–3793.
- COPALUX. **Lâmpadas: Qual a diferença entre luz quente e luz fria?** Copalux Blog, 13 ago. 2024. Disponível em: https://www.copalux.com.br/blog/diferenca-entre-luz-quente-e-luz-fria?srsId=AfmBOopp9ZSAHg_L0TDTn-VmOgH4VCUI2zMbDW3Bx9YnlhmTn7iXEA01. Acesso em: 31 out. 2025.
- DE OLIVEIRA SILVA, José Júnior; DA SILVA RODRIGUES, Eriverton; DOS SANTOS RIBEIRO, Daiane Maria; SOUZA DA SILVA, Marcelo. Uma proposta experimental em mecânica quântica: uns fótons, uma fenda, uma foto. Scientia Plena, v. 12, n. 10, 2016. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/3045>. Acesso em: 31 out. 2025. DOI: 10.14808/sci.plena.2016.104102.
- FORATO, Thaís Cyrino Mello. **O Éter, a Luz & a Natureza da Ciência: Texto III – Newton & o Fenômeno das Cores**. [S.l.]: NUPIC/USP, 2016. Disponível em: https://sites.usp.br/nupic/wpcontent/uploads/sites/293/2016/05/TEXT0_03.pdf. Acesso em: 26 set. 2025.
- FREIRE, Paulo. **Pedagogia da Autonomia: Saberes Necessários À Prática Educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 1996.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Óptica & Física Moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 4.
- HECHT, E. **Óptica**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 12ª ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2015.
- IMAGEJ. Versão 1.54. Desenvolvedor: **Wayne Rasband**. Disponível em: <https://imagej.net/ij/>. Acesso em: 24 set. 2025.
- LEDYI Lighting. **Everything You Need to Know About Full Spectrum Lighting**. 28 dez. 2022. Disponível em: https://www.ledyilighting.com/pt/everything-you-need-to-know-about-full-spectrum-lighting/#Is_My_Bulb_Full_Spectrum. Acesso em: 02 out. 2025.

LOJA PROLAB. **Loja Prolab**. Disponível em: <https://www.lojaprolab.com.br/espectrofotometro-digital-faixa-de-190-a-1100nm-uv-vis-automatizado-e-largura-de-banda-de-2nm-80350>. Acesso em: 07 out. 2025.

MORAN, José Manuel. **A Educação Que Desejamos: Novos Desafios & Como Chegar Lá**. 5. ed. Campinas: Papirus, 2013.

OLIVEIRA, P. C. C.; LEITE, M. A. P. **Espectrofotometria No Ensino Médio: Construção De Um Fotômetro De Baixo Custo & Fácil Aquisição**. Química Nova na Escola, v. 38, n. 2, p. 181-184, 2016.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia & Astrofísica**. 4ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

OBSERVATÓRIO PHOENIX. **K13 – O Espectroscópio**. Ensaios, Internet. Disponível em: https://www.observatorio-phoenix.org/k_ensaios/24_k13.htm Acesso em: 3 out. 2025.

SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals Of Photonics**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

THEREMINO SYSTEM. **Theremino Spectrometer Spectrums**. 2014. Disponível em: <https://www.theremino.com/en/> Acesso em: 02 out. 2025.

THEREMINO SPECTROMETER. Versão 3.1.0. Desenvolvedor: **Theremino System**. Disponível em: <https://www.theremino.com/en/downloads/automation>. Acesso em: 24 set. 2025

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física Para Cientistas & Engenheiros: Eletricidade, Magnetismo & Óptica**. Volume 2. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física: Ótica & Física Moderna**. Volume 4.14. ed. Tradução de Daniel Vieira. Porto Alegre: Pearson Addison Wesley, 2016.

ZILIO, S. C. **Óptica Moderna: Fundamentos & Aplicações**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2010.

APÊNDICE A — ESPECTRÔMETROS & PREÇOS

1 – ESPECTRÔMETROS ARTESANAIS



Fonte: elaborado pelo autor.

2 – CUSTOS DE FABRICAÇÃO DO EXPERIMENTO EM 2025.

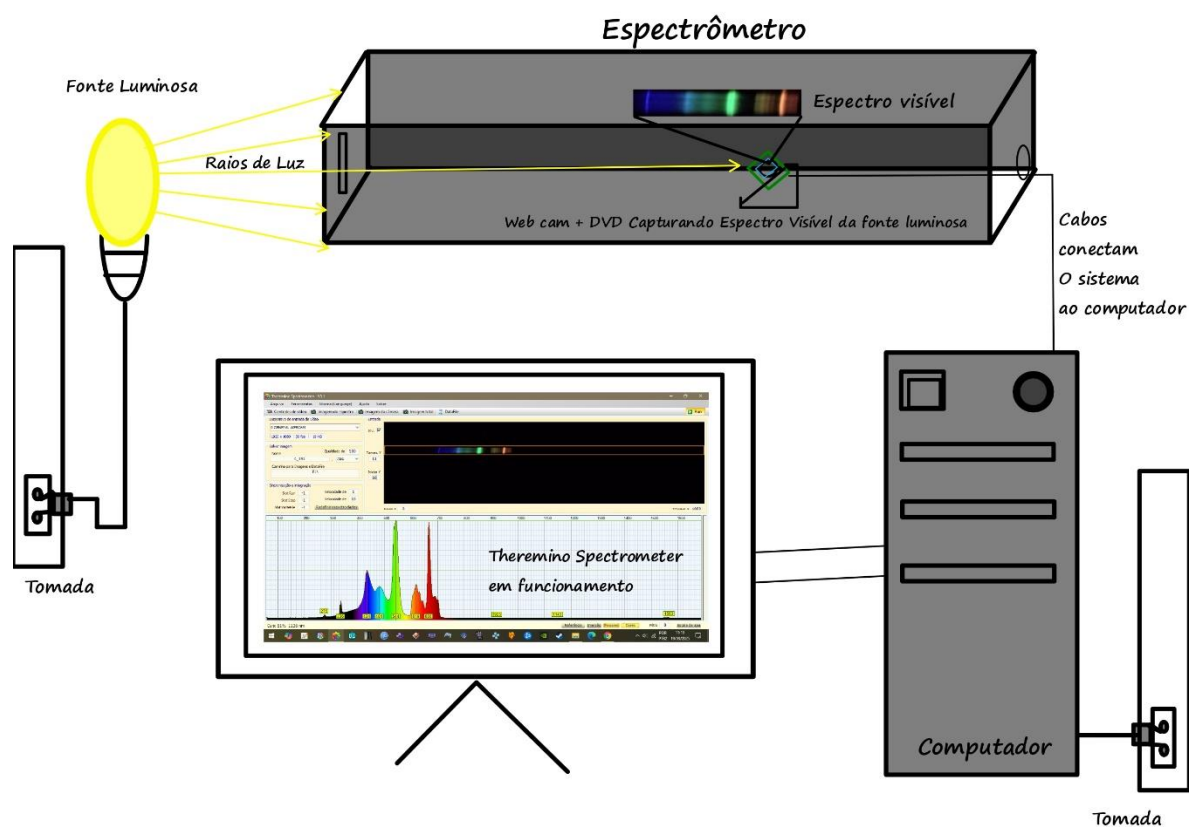
Tabela 8: Apêndice A-2, dos preços dispendidos.

Material e/ou Serviço	Valor em R\$
Webcam FHD 1080p Compatível com Win10 modelo CAM-7414	40,00
Madeira & Marceneiro apto a produzir uma caixa destas dimensões	20,00
Tinta Spray Baixas Temperaturas na cor Preto Fosco	17,00
Lâmpadas Fluorescente e LEDs	15,00
Cola ou Pregos	5,00
CD/DVD Virgem	3,00
Total	100,00

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE B — ILUSTRAÇÃO DO ESPECTRÔMETRO

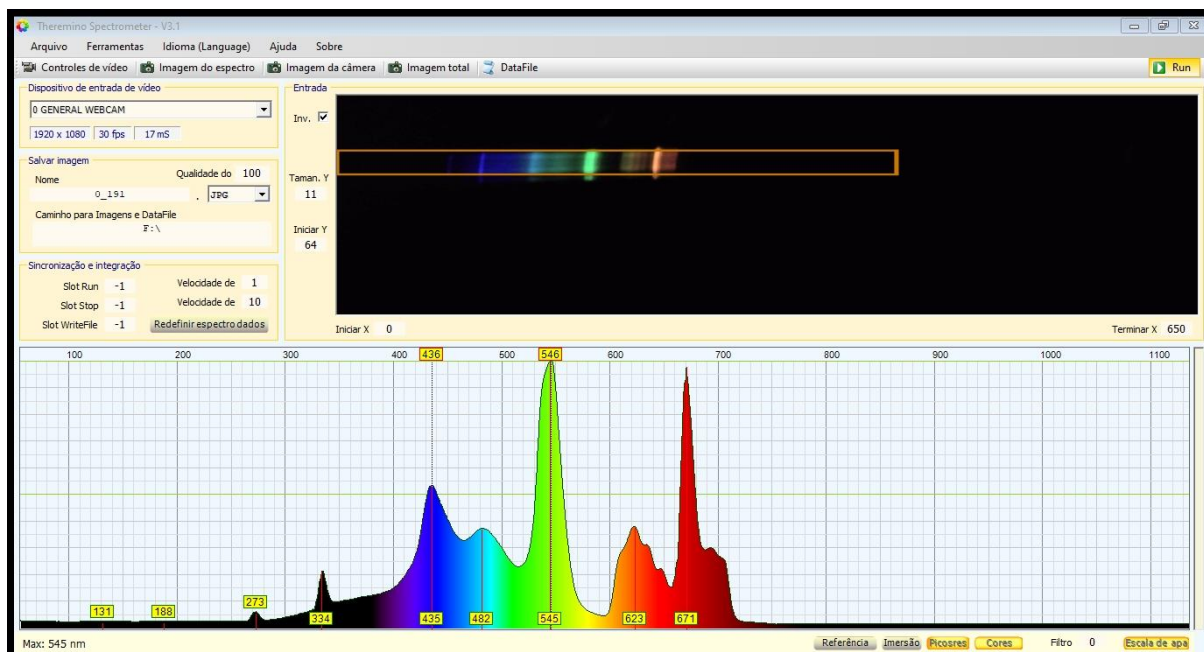
ESQUEMA ILUSTRADO DE FUNCIONAMENTO DO ESPECTRÔMETRO



Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE C — SOFTWARES UTILIZADOS

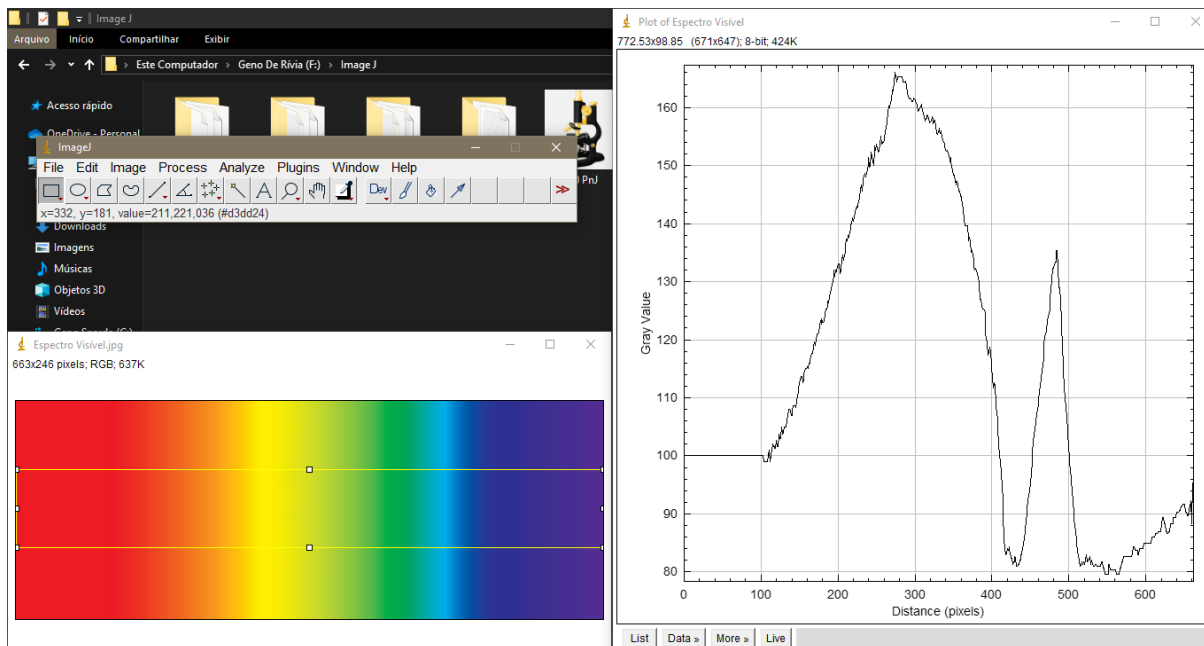
1 – PROGRAMA COMPUTACIONAL THERAMINO SPECTROMETER (TS).



Fonte: elaborado pelo autor usando Theremino Spectrometer.

Link: <https://www.theremino.com/en/downloads/automation>.

2 – PROGRAMA COMPUTACIONAL IMAGEJ (IJ).



Fonte: elaborado pelo autor usando o ImageJ.

Link: <https://imagej.net/ij/>.